



**BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
CAM TOZU VE ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ETKİSİ**

Mahir ALIYEV

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemeleri Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Meral OLTULU
2019**

Her Hakkı Saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE CAM TOZU VE
ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU
ETKİSİ**

Mahir ALIYEV

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Yapı Malzemeleri Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü



TEZ ONAY FORMU

BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE CAM TOZU ve ALKALİLERLE AKTİVE
EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ETKİSİ

Dr.Öğr.Üyesi Meral OLTULU danışmanlığında, Mahir ALİYEV tarafından hazırlanan bu çalışma, 23/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemeleri Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof.Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

İmza :

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Meral OLTULU

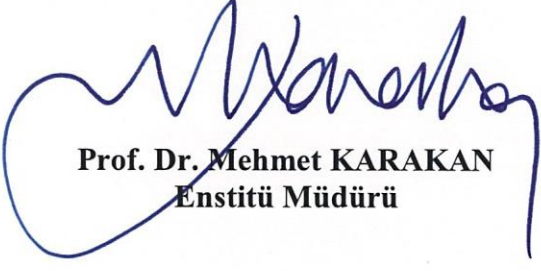
İmza :

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Türkay KOTAN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun 26.09/2017 tarih ve 38 / 70 nolu kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE CAM TOZU VE ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ETKİSİ

Mahir ALIYEV

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemeleri Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Meral OLTULU

Bu çalışma, beton üretiminde çimentonun bir kısmı yerine atık cam tozlarının ve alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufunun kullanılmasını böylelikle çimento kullanımının azaltılarak üretilen betonun özelliklerinin araştırılması için yapılmış bir dizi deneysel çalışmayı içermektedir.

Çalışmada bağlayıcı olarak çimento ve onun bir kısmı yerine cam tozu, yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Ayrıca aktivatör olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) kullanılmıştır. Aktivatörler, YFC (yüksek fırın cürufu) ağırlığının %2 ve 4'ü oranlarında Na^+ konsantrasyonu içerecek şekilde eklenerek beton numuneler üretilmiştir.

Kontrol grubu ile birlikte 15 grup beton numunesi üretilmiş olup numuneler üzerinde 60 günlük basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmış ve genel olarak havada kürenen betonlarda seçilen çimento ağırlığının %15'i oranında aktifleştirilmiş YFC ve cam tozu katkıların kullanımının uygun olduğu görülmüştür. Tüm gruplar göz önüne alındığında en iyi sonucun karma aktivatör kullanılan numunelerde görüldüğü tespit edilmiştir.

2019, 77 sayfa

Anahtar Kelimeler: Cam tozu, alkali aktivatör, yüksek fırın cürufu, basınç dayanımı, eğilme dayanımı.

ABSTRACT

MS Thesis

THE EFFECT of GLASS POWDER and ALKALI ACTIVATED BLAST FURNACE SLAG on MECHANICAL PROPERTIES of CONCRETE

Mahir ALIYEV

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Construction Materials

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Meral OLTULU

This study includes the use of glass powder and alkaline activated blast furnace slag in the production of concrete instead of part of the cement, which reduces the use of cement and the properties of concrete and investigating the properties of the concrete produced.

In the study, instead of cement and a part of cement, glass powder and blast furnace slag were used as binders. In addition, sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium carbonate (Na_2CO_3) were used as activators. Concrete samples were obtained by adding activators containing Na^+ with a concentration of %2 and %4 by weight of blast-furnace slag.

Including control group, 15 groups of concrete samples were manufactured and 60-day compressive and flexural on samples and overall air curing blast furnace slag activated rate of %15 of the selected weight of cement, concrete and glass powder was found to be suitable for use of additives. When all groups were taken into account, it was found that the best results were obtained in samples using a mixed activator.

2019, 77 pages

Keywords: Glass powder, alkali activator, blast furnace slag, compressive strength, bending strength.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Meral OLTULU'ya içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Alkali aktivatörleri konusunda bilgisinden yararlandığım Sayın Doç. Dr. Rövşen GULİYEV'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmadaki deneyler, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarında yapılmıştır. Deneyleri yaparken yardımlarını esirgemeyen laboratuvar teknikeri İlhami AYHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneyler için malzemelerin temin edilmesinde destek olan Mesut YILMAZ'a, Cemil Cahit BİLGİN'e ve İsa TSİTELADZE'ye de teşekkürlerimi sunarım.

Her türlü konuda daima bana destek olan ve beni asla yalnız bırakmayan sevgili eşime içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Mahir ALIYEV

Eylül, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	6
2.1. Cam Tozu, Yüksek Fırın Cürufu ve Alkali Aktivatörleri	6
2.1.1. Cam atıklar ve cam tozu.....	6
2.1.2. Yüksek fırın cürufu	9
2.1.3. Alkali aktivatörler.....	13
2.2. Literatür Çalışması	21
2.2.1. Yüksek fırın cürufu ve alkali aktive içeren çalışmalar.....	21
2.2.2. Cam atıkları içeren çalışmalar	31
2.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	37
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	38
3.1. Materyal.....	38
3.1.1 Çimento	38
3.1.2. Yüksek fırın cürufu	39
3.1.3. Atık cam	40
3.1.4. Agregalar	41
3.1.5. Aktivatörler: sodyum karbonat.....	43
3.1.6. Aktivatörler: sodyum silikat.....	43
3.1.7. Su.....	44
3.1.8. Deneylerde kullanılan aletler.....	44
3.2. Yöntem	48
3.2.1. Numunelerin kodlanması	48
3.2.2. Harç ve beton karışımlarının hazırlanması ve üretimi	48

3.2.3. Numuneler üzerinde yapılan deneyler.....	53
3.2.4. Birim ağırlık deneyi.....	53
3.2.5. Çökme deneyi.....	53
3.2.6. Basınç dayanımı deneyi.....	54
3.2.7. Eğilme dayanımı deneyi.....	55
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	57
4.1. Numunelerin Fiziko-mekanik Deney Sonuçları.....	57
4.1.1. Birim ağırlık deney sonuçları	57
4.1.2. Çökme deneyi sonuçları	59
4.1.3. Basınç dayanımı sonuçları.....	61
4.1.4. Eğilme dayanımı sonuçları	64
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	78

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

%	Yüzde oranı
μm	Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
Al_2O_3	Alüminyum oksit
CaO	Kalsiyum oksit
cm	Santimetre
CO_2	Karbondioksit
CT	Cam tozu
dak	Dakika
Fe_2O_3	Demir oksit
g	Gram
K	Kontrol betonu numunesi
kg	Kilogram
mm	Milimetre
N	Kırılma yükü
NC	Sodyum karbonat (Na_2CO_3)
NS	Sodyum silikat (Na_2SiO_3)
PÇ	Portland çimentosu
SiO_2	Silika
YFC	Yüksek fırın cürufu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Cam atıkların cam tozu haline getirilmesi	8
Şekil 2.2. Yüksek fırın cürufunun üretim şeması	10
Şekil 2.3. Alkali aktivasyon tipik gösterimi	17
Şekil 3.1. Öğütülmüş ince taneli YFC	39
Şekil 3.2. Toplanan atık camlar	40
Şekil 3.3. (a),(b) Öğütme makinası.....	40
Şekil 3.4. (a),(b) Öğütülmüş cam tozu.....	41
Şekil 3.5. (a), (b), (c), (d) 0-2mm, 2-4mm, 4-8mm ve 8-16mm agregalar	42
Şekil 3.6. Kullanılan sodyum karbonat.....	43
Şekil 3.7. Deneylerde kullanılmış elekler.....	45
Şekil 3.8. Deneylerde kullanılmış plastik küp kalıplar	45
Şekil 3.9. Deneylerde kullanılmış metal kalıplar.....	46
Şekil 3.10. 5x5x5cm küp kalıplar	46
Şekil 3.11. Deneylerde kullanılmış betoniyer.....	47
Şekil 3.12. Hidrolik pres makinası.....	47
Şekil 3.13. Betonun üretim aşamaları	49
Şekil 3.14. Kalıba yerleştirilmiş numuneler	52
Şekil 3.15. Hava kürü ortamında bekletilen numuneler	53
Şekil 3.16. Çökme deneyi aparatı	54
Şekil 3.17. Basınç dayanımı deneyi.....	55
Şekil 3.18. Numunelerin eğilme dayanımı deneyi.....	56
Şekil 4.1. Grupların birim ağırlık grafiği	58
Şekil 4.2. Deney numunelerinin çökme değeri sonuçları	61
Şekil 4.3. 60 günlük basınç dayanımı sonuçları (%15YFC).....	63
Şekil 4.4. 60 günlük basınç dayanımı sonuçları (%7,5YFC+%7,5CT)	64
Şekil 4.5. 60 günlük eğilme dayanımı sonuçları (%15YFC).....	66
Şekil 4.6. 60 günlük eğilme dayanımı sonuçları (%7,5YFC+%7,5CT)	66
Şekil 4.7. Eğilme ve basınç dayanımı ilişkisi (%15YFC)	67
Şekil 4.8. Eğilme ve basınç dayanımı ilişkisi (%7,5YFC+%7,5CT).....	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Türkiyede geri kazanabilir atık malzeme yüzdeleri	8
Çizelge 2.2. Yüksek fırın cürufalarının kimyasal kompozisyonları	12
Çizelge 2.3. Alkali aktive çalışmaları tarihçesi	13
Çizelge 3.1. CEM II 32,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri	38
Çizelge 3.2. CEM II 32,5 R çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri	38
Çizelge 3.3. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri	39
Çizelge 3.4. Camların genel kimyasal bileşimleri	41
Çizelge 3.5. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri	42
Çizelge 3.6. Sodyum karbonatın kimyasal özellikleri	43
Çizelge 3.7. Sodyum silikatın kimyasal özellikleri	44
Çizelge 3.8. Deney grupları	50
Çizelge 3.9. Deney karışım oranları	51
Çizelge 4.1. Grupların birim ağırlık deney sonuçları	58
Çizelge 4.2. Çökme deneyi sonuçları	60
Çizelge 4.3. 60 günlük basınç dayanımı sonuçları	63
Çizelge 4.4. 60 günlük eğilme dayanımı sonuçları.....	64

1. GİRİŞ

Endüstriyel atıkların işlenmesi, onların toplanması, depolanması ve nötrleştirilmesi gerçek çevre sorunlarından biridir. Ekonomik açıdan atıkların geri dönüştürülmesi karlı bir iş olmamakta, atığın kullanılması ise önemli miktarda yakıt, enerji tasarrufu ve doğal kaynakların korunması gibi birçok çevresel sorunu çözebilmektedir. Doğanın kirlenmesi dünyamızda, ülkemizde başlıca problemlerden biri olarak kalmakta ve olumsuz etkisi gün geçtikçe artmaktadır. Kirlenmenin tam bitmesi mümkün olmazsa bile kısmen azalması için atılacak adımlardan biri endüstriyel atıkların gerekli şekilde kullanılması, çevre kirliliğinin azaltılmasıdır.

Yapı malzemelerinden en popüler olan betonda kullanılan çimentonun maliyeti yüksektir. Sadece yüksek maliyetin dışında üretiminin çevre kirliliğine sebep olması da söz konusudur. Üretim esnasında ham maddelerden kaynaklanan veya açığa çıkan gazların çevreyi, havayı olumsuz etkilemesi çimentonun olumsuz etkilerini göstermektedir. Çimento üretiminde yüksek miktarda CO₂ gazı havaya karışmaktadır (Erdoğan 2016).

Çimentonun üretim aşamalarında çevreye bu şekilde zararlı etkilerinin dışında, üretim zamanı ve enerji masrafları da başlıca sorunlardandır. Çimentonun bu sayılan dezavantajlarını dikkate alarak yıllardır beton için çimento miktarını azaltacak şekilde (hatta bazı deney çalışmalarında tam çimentosuz halde) farklı katkı maddeleri veya çimento içeriğine benzer maddelerle deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar taze betonun daha ekonomik ve daha yüksek performans özellikleri sağlama avantajının yanında çevre kirliliğini de azaltmış olduğunu göstermektedir.

Atık malzemelerin yapı malzemelerinde kullanımı popüler olmakla birlikte bu malzemeler yapı malzemelerinin çoğu özelliklerini de iyileştirilebilmektedirler. Betonda kullanılan mineral katkı malzemeleri esasen üç gruba ayrılmaktadır. Beton endüstrisinde kullanılan mineral katkılar doğal olarak elde edilen (örneğin; volkanik küller, diatomlu

topraklar vd.), esas ürün olarak elde edilmeyen mineral katkıları (örneğin, uçucu küller, silis dumanı, yüksek fırın cürufu) ve bazı işlemler uygulanarak elde edilen mineral katkıları (örneğin, pişirilmiş kil vd.) olarak üç gruptur. Bir kısım mineral katkıları üretildiği zaman ince boyutlu yapıya sahip olmakta ve beton karışımlarında direkt kullanılabilirler. İnce taneli mineral katkı maddeleri taze betonun işlenebilirliğini artırmakta, terleme, segregasyon ve hidrasyon ısısı gibi sorunları azaltmaktadır. Ayrıca alkali-silika reaksiyonu sonucunda oluşan genleşmeyi, su geçirgenliğini ve nihai dayanımını azaltmakta, sülfata karşı direnci ise artırmaktadır. En önemlisi ise daha ekonomik bir beton elde etme avantajı sağlamaktadır (Erdoğan 1997).

Bu malzemeler puzolan özelliği de gösterebilmekte yani bağlayıcılık özelliği az veya hiç olmayan ama çok ince taneli olduğu zaman ve nemli ortamlarda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği gösteren bileşenlerin oluşmasına sebep olan silisli ve silis alüminli malzeme sayılabilmektedirler (Anonymous 1993; Anonymous 1994).

Bu malzemelerden yüksek fırın cürufu ise (YFC), demir-çelik fabrikalarında yüksek fırınlarda demir üretimi sırasında açığa çıkan atık madde çeşitlerinden biridir. Hammaddelerle devamlı olarak beslenmekte olan yüksek fırınlarda sıcaklık 1600°C'lerde olmaktadır. Yüksek sıcaklık sonucunda ergiyen bu malzemeler üst kısımda cüruf, alt kısımda pik demir olacak şekilde fırının en alt kısmında toplanmaktadır (Erdoğan 2004).

İnce taneli yüksek fırın cüruflarının, kalsiyum hidroksitle ve suyla karışımından elde edilmiş bağlayıcılık özelliği 1774 yılından beri bilinmekle beraber ve bu bağlayıcı malzeme ilk kez 1869 yılında Paris metrosu inşaatında kullanılmıştır (Mielenz 1983; Virgalitte *et al.* 1995). Kalsiyum hidroksitle birlikte sulu ortamda hidrolik bağlayıcı madde olarak da kullanılabilir. Ayrıca portland çimento klinkeri ve az miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülmüş halde cüruf amorf yapıya sahip ve çok ölçüde SiO₂ ve Al₂O₃ içermesi sebebiyle puzolanik özellik gösterebilmekte (Erdoğan 2003) ve betonda katkı maddesi olarak kullanılabilir (Erdoğan 2016).

YFC'nin çimento yerine belirli miktarda kullanılması durumunda erken zamanlarda beton dayanımları düşebilir. Fakat 28. günlük yaştan sonra dayanımı artarak yükselmekte ve çimento ile üretilen betonlardan daha yüksek basınç dayanımları elde edilebilmektedir (Erdoğan 1997; Tokyay 2003).

YFC betonda kullanıldığı zaman taze beton işlenebilme özelliği artmaktadır. YFC ince taneli öğütülerek betona katıldığı için betonda ince madde hacmini arttırarak, iri taneli maddeleri hareketini de kolaylaştırmaktadır. YFC çimentoya göre daha geç ve yavaş reaksiyonlara girebildiği için betonunda priz süresinin artmasına sebep olabilmektedir. Daha çok sıcak hava durumlarında beton dökümü zamanı daha avantajlı olmaktadır. Ancak soğuk hava durumlarında YFC ile yapılan betonlarda ilave olarak priz hızlandırıcı kullanılması gerekmektedir. Ayrıca YFC çimento yerine kullanıldığı zaman betonda kullanılan çimento miktarı da azalmaktadır ve aynı zamanda betonun hidrasyon ısısının azalmasına neden olmaktadır (Erdoğan 1997; Tokyay 2003).

Uçucu küller ve yüksek fırın cürufalarının yapılarında Al_2O_3 , SiO_2 ve CaO gibi amorf bileşenler bulunduğundan bu malzemeler ile alkali aktivatörler de kullanarak iyi bir bağlayıcılık özelliği olan karışım elde edilebilir. Alkali aktivatörleri ile yapılan bağlayıcı özellikli malzemelerin kullanımı yüksek performans ve çevrenin daha az zarar görmesi gibi avantajlar sağlamaktadır. Çok miktarda atık malzeme kullanılması durumunda bahsedildiği gibi atıkların çevreye verdiği zararlar ve malzemelerin depolanma sorunları da ciddi bir şekilde azalmaktadır (Aydın 2010).

Ayrıca yüksek fırın cürufalarını betonda aktive etmek için aktivatör olarak fabrikalardan açığa çıkan karbonatlar, silikatlar da kullanılabilir. YFC sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve diğer alkalilerle aktive edilebilirler (Huanhai *et al.* 1993; Collins *et al.* 2000). Literatür ve deneysel çalışmalar dikkate alındığı zaman silika ve alümin içeren tüm malzemeler alkalilerle aktive edilerek kullanılabilir. Şimdiye kadar yapılan bir çok çalışmada kaolinitik killer, uçucu kül, yüksek fırın cürufaları alkalilerle aktive edilerek kullanılmıştır. Aktive edilecek alüminosilikat malzemelerin yapısı alkali aktive edilmiş malzemelerin mekanik dayanımını etkilemektedir ve dayanım yapıya

bağılıdır. En yüksek dayanımlara yüksek fırın cürufu gibi malzemelerin kullanımı ile ulaşılmaktadır (Aydın 2010).

Alkali aktivasyonu ilk defa Alman kimyacı ve mühendis Kühl tarafından 1908 yılında sertleşmiş bir portland çimentosu ile silika ve alümina içeren katı malzemelerde yapılmıştır. Daha sonra Purdon 1940 yılında alkalilerle ilgili çalışmaları daha da geliştirmiştir (Ismail *et al.* 2014).

Alkaliler; kostik alkaliler (alkali hidroksitler: MOH), silikatlar ($M_2O.nSiO_2$), zayıf asitli tuzlar (M_2CO_3, M_2SO_3), alüminatlar ($M_2O.nAl_2O_3$), alüminosilikatlar ($M_2O.nAl_2O_3.SiO_2$), güçlü asitli tuzlar (M_2SO_4) olarak ayrılmaktadır. Birlikte kullanılan aktivatörler NaOH, Na_2SO_4 , Na_2CO_3 ve diğerlerini örnek verebiliriz. En çok kullanılan aktivatörler ise hidroksitler ve sodyum silikatlardır. Ayrıca sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum silikatlar ve potasyum hidroksitler geopolimerleşme için en çok kullanılan silikatlardır (Petermann *et al.* 2010).

Silikat çözeltilerinde SiO_2/Na_2O oranı, sıcaklık değişimi, aktivatörlerin sıvı içinde yoğunlukları, oranları ve bileşen karışımları üretilen kompozit özelliklerini değiştirmektedir. Hem esas bileşen hem de normal bileşenin ölçüsü malzemenin kendi özelliklerine de etki etmektedir (Moon *et al.* 2010).

Betonda çimento yerine kullanılması öngörülen malzemelerden biri de camlardır. SiO_2 açısından zengin bir hammadde olan cam atıklarının öğütülerek toz şeklinde betonda kullanılması oldukça iyi sonuçlar vermekte, cam bu amaçla çimentonun belirli kısmı yerine kullanılabilir. Bu kullanımla ya puzolanik özellik göstererek performansı olumlu etkileyecek aksi durumda bile dolgu etkisi yaparak kompasiteyi artırmasını sağlayacak, hem de atık malzemenin tekrar kullanımı sağlanabilmektedir.

Cam, genellikle kristalimsi olmayan silika, sodyum oksit, kalsiyum oksit ve diğer bileşenlerden oluşan katı bir malzemedir. Kimyasal bileşim esas olarak kullanılan hammaddelere bağlıdır ve her bir cam türü için biraz farklılık gösterir. En yaygın soda-

kireç camları $\geq \%70$ amorf SiO_2 , $\geq \%12$ Na_2O ve $\geq \%5$ CaO 'dan oluşur. Şekilsiz ve nispeten büyük miktarlarda silikon içeren cam, beton endüstrisi için mükemmel bir puzolanik malzeme olmalıdır. Bu nedenle, cam toz haline getirildiğinde, teoride kısmi çimento değişimi olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, cam tozu, alkali-silika reaksiyonunu başlatabilen çok yüksek miktarda Na_2O 'ya sahiptir. Bu nedenle cam tozu, tartışmalı bazı gerçeklerle nitelenebilir: puzolanik madde olarak kabul edilebilecek kadar amorf SiO_2 vardır; mevcut CaO , su ve amorf SiO_2 ile reaksiyona girerek düşük bazik C – S – H oluşturur (Moon *et al.* 2010).

Bu çalışmada çimento kullanım miktarını azaltmak amacıyla hem en çok kullanılan puzolanlardan YFC alkalilerle aktive edilerek kullanılmış hem de atık malzeme olan cam tozunun YFC ve alkalilerle birlikte beton özelliklerine etkisi irdelenmeye çalışılmıştır.

Bu kapsamda çimento ağırlığının $\%15$ 'i oranında YFC ve cam tozu kullanılmış, aktivatör olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) kullanılmıştır. Aktivatörler, YFC (yüksek fırın cürufu) ağırlığının $\%2$ ve 4 'ü oranlarında Na^+ konsantrasyonu içerecek şekilde eklenerek beton numuneler üretilmiştir. Kontrol grubu ile birlikte üretilen numuneler üzerinde 60 günlük basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Cam Tozu, Yüksek Fırın Cürufu ve Alkali Aktivatörleri

Çimento üretim endüstrisinde karbondioksit etkisi, orman tahribi ve fosil yakıt yakımı gibi dezavantajlar bulunmakta karbondioksit içeren sera gazlarının yayılması sonucunda dünyada küresel ısınma gibi ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu ısınmanın %65 gibi büyük bir oranı karbondioksit etkisine bağlıdır. Bu durum çimento kullanımına alternatif olarak kullanılabilecek başka ve daha farklı bağlayıcılar aramayı gerekli kıldığından konu ile ilgili çeşitli akademik çalışmalar yapılmaktadır (Lu *et al.* 2017).

Ayrıca son yıllarda, atık maddeler problemi için bir çözüm olarak betonda atık veya geri dönüştürülebilir malzemelerin potansiyel kullanımından yararlanmak veya betonun özelliklerini geliştirmek için pek çok araştırma yapılmıştır (Dyer and Dhir 2001).

Çimento miktarını azaltmak maksadıyla çeşitli puzolanik malzemeler kullanımı popüler olmakla birlikte bu amaçla atık malzemelerinde kullanımı ekonomik açıdan çok istenen bir durumdur. Atık cam tozu ve YFC bu amaçla kullanılacak en iyi malzemelerden birkaçı olarak sayılabilmekte ve bu bölümde bunların genel özelliklerinden bahsedilmektedir.

2.1.1. Cam atıklar ve cam tozu

Cam, genellikle kristalimsi olmayan silika, sodyum oksit, kalsiyum oksit ve diğer bileşenlerden oluşan katı bir malzemedir. Kimyasal bileşimi esas olarak kullanılan hammaddelere bağlıdır ve her bir cam türü için biraz farklılık gösterir. En yaygın soda-kireç camları $\geq \%70$ amorf SiO_2 , $\geq \%12$ Na_2O ve $\geq \%5$ CaO 'dan oluşur. Şekilsiz ve nispeten büyük miktarlarda silikon içeren cam, bu nedenle cam toz haline getirildiğinde, teoride kısmi çimento değişimi olarak kullanılabilir. Puzolanik madde olarak kabul edilebilecek kadar içerisinde amorf SiO_2 vardır; Mevcut CaO , su ve amorf SiO_2 ile

reaksiyona girerek düşük bazik C-S-H da oluşturur. Cam ayrıca alkali silika reaksiyonu için bir kaynak olan çok yüksek bir Na_2O miktarına sahiptir (Moon *et al.* 2013). Bununla birlikte, cam tozunun mikro yapıyı ve ultra yüksek performanslı betonun özelliklerini nasıl etkilediğini anlamak için daha derin bir araştırma yapılması gerekir (Anonymous 2014).

En yaygın bileşenlerine dayanarak cam: vitre silika, alkali silikatlar, soda-kireç camı, borosilikat cam, kurşun cam, baryum cam ve alümino-silikat cam olarak farklı kategorilere ayrılabilir. Cama farklı renkler vermek veya spesifik özellikleri geliştirmek için cam üretimi sırasında genellikle küçük miktarlarda katkı eklenir. Soda-kireç camı kaplar ve tabaka üretimi için en yaygın şekilde kullanılır. Kurşun cam esas olarak kristal sofralar, tv ekranları ve ekran ekipmanı, borosilikat cam, cam elyafı, yün yalıtımı ve fırın kabı ve termos sobaları yapmak içindir. Alüminyum-silikat camı, bilimsel ve optik aparatlar içindir.

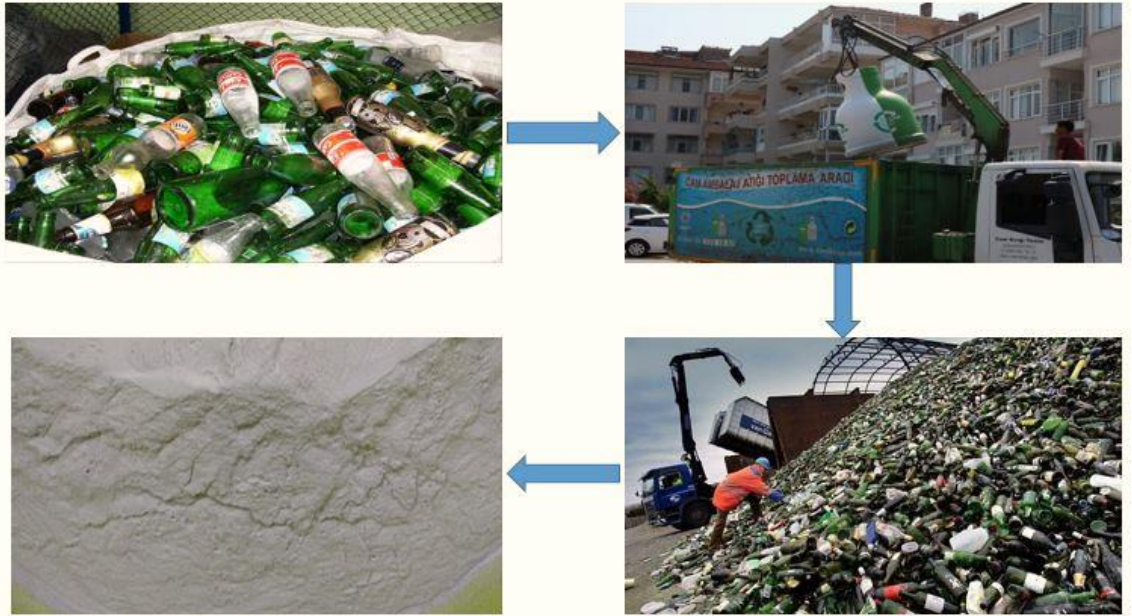
Cam evsel ve endüstriyel atıkların büyük bir bölümünü oluşturur. Atık camda, konteyner camı atık camın yaklaşık %80'ini oluşturur. Bu camların ana bileşimi, renk amaçlı kullanılan az miktarda katkı maddeleri hariç aynıdır. Soda-kireç camı, yaklaşık olarak %73 SiO_2 , %13-13 Na_2O ve %10 CaO 'dan oluşur. Böylece, kimyasal bileşimlerine göre, soda kireç camları daha iyi puzolanik malzemeler olacaktır (Xiao *et al.* 2013).

SiO_2 açısından zengin bir hammadde olan cam atıklarının öğütülerek toz şeklinde betonda kullanılması oldukça iyi sonuçlar verebilmektedir. Cam bu amaçla çimentonun belirli kısmı yerine kullanılabilir, bu kullanımla ya puzolanik özellik göstererek performansı olumlu etkileyecek aksi durumda bile dolgu etkisi yaparak kompoziteyi artırması, hem de atık malzemenin kullanımı sağlanabilmektedir.

Türkiye Cumhuriyetinde geri kazanabilir atık malzeme oranları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Bu değerler incelendiğinde Şekil 2.1'de gösterilen cam atıkların yeniden değerlendirilmesi ekonomiye büyük kazanç sağlayacaktır.

Çizelge 2.1. Türkiyede geri kazanabilir atık malzeme yüzdeleri (Kılıçoğlu 2013)

Geri kazanabilir atık malzemeler	Oran (%)
Kağıt ve karton türü atıklar	45.48
Metal atıklar	8.62
Cam atıklar	18.46
Plastik atıklar	19.19
PET,PVC atıklar	6.15
Lastik ve kauçuk atıklar	3.35
Tekstil atıklar	4.88



Şekil 2.1. Cam atıkların cam tozu haline getirilmesi

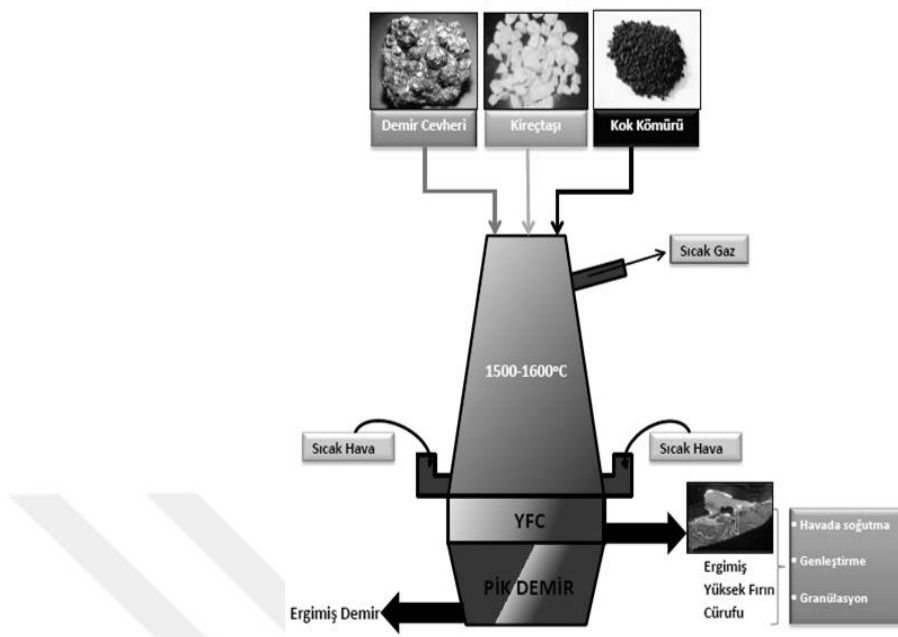
CT çeşitli uygulamalarda, örneğin imalat aşındırıcılarında kullanılabilmektedir. CT'nin inşaat endüstrisinde beton üretimi için kullanılması, CT imha maliyetini azaltmada olumlu bir adım olduğunu da göstermektedir. Genellikle cam beton olarak adlandırılan camla hazırlanan beton, yol döşemesi ve park alanlarının yapımında geleneksel betonun yerine kullanılabilir (Yuksel *et al.* 2013).

Atık depolama alanlarına atılan atık camın geniş akışını azaltmak için önerilen çözümlerden biri, atık camı doğal mineral agregaların yerine portland çimentosu betonunda agrega olarak kullanmaktır. Atık geri dönüşümlü camın beton bileşen olarak kullanılması, bu uygulamayı tanıtmak ve ileri geri dönüşümlü camı birincil malzemeye alternatif olarak yapı pazarına güvenle tanıtmak için daha fazla inceleme gerektiren nispeten yeni bir teknolojidir.

Bazı araştırmalar, cam karışımın beton karışımlarında, ince veya kaba bir agrega değişiminde kullanılmasının farklı yönlerini araştırmıştır. Bu çalışmalarda, işlenebilirlikteki azalma ve basınç dayanımı (%25 ile %30'un üzerindeki değiştirme seviyeleri için) gibi konular çalışılmıştır. Bununla birlikte, cam agreganın zararlı alkali-silika reaksiyonuna (ASR) duyarlılığı, yaygın kullanımını engelleyen asıl sorun olmuştur (Cota *et al.* 2015). Fakat son araştırmalarda, ince öğütülmüş cam tozunun (ortalama partikül büyüklüğü 17 μm olan) betonda kullanılmasının, kırılmış cam agrega malzemesi olarak kullanıldığında bile ASR endişelerini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir (Nwaubani and Poutos 2013). Bu yüzden cam tozunun mikro yapıyı ve ultra yüksek performanslı betonun özelliklerini nasıl etkilediğini anlamak için daha derin bir araştırma yapılması gerekmektedir (Anonymous 2014).

2.1.2. Yüksek fırın cürufu

Doğada demir oksit olarak görülen hematit ve magnetit demir cevherlerinin yüksek fırınlarda çok yüksek sıcaklıklara kadar (1600 °C) ısıtılarak oksijenlerden ve yabancı maddelerden arındırılması ile demir elde edilir. Bu fırınlarda yakıt olarak karbon kullanılır, ayrıca arıtma işlemini kolaylaştırmak için kalker taşı da ısıtılmaktadır. Yüksek sıcaklık sonucunda karbon ile demir oksidindeki oksijen birleşmekte ve karbon monoksitle karbon dioksit gazları halinde fırından çıkmaktadırlar. Daha sonra solüsyon halinde demir ve CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, S gibi yabancı maddeler ayrılmaktadır. Şekil 2.2'de yüksek fırın cürufunun şeması görülmektedir (Erdoğan 2004).



Şekil 2.2. Yüksek fırın cürufunun üretim şeması

Yüksek fırın cürufu da (YFC), demir-çelik fabrikalarında yüksek fırınlarda demir üretimi zamanı açığa çıkan atıktır. Yüksek fırın cürufları farklı demir üretim fabrikalarında açığa çıkarak kullanılmayan atık madde çeşitlerinden biridir. Yüksek fırın cürufu birden soğutularak granüle hale getirilir ve öğütülebilir. Atık malzeme halinde yüksek fırından açığa çıkan çözelti halindeki cüruflar 1500°C sıcaklıktadırlar. Zamanla bu haldeki cüruf havada soğutularak kristal yapıya sahip olmaktadır. Yalnız çözelti halindeki cüruflar suya döküldüğünde hem iri taneli hem de ince taneli granüle haline gelmektedirler ve çok oranda amorf (camsı) yapı elde etmektedirler. Öğütülen bu malzeme çimentoya ve betona katılarak kullanılabilir. Amorf yapıya sahip olan yüksek fırın cürufu çok ölçüde SiO_2 ve Al_2O_3 içermesi sebebiyle puzolanik bir özellik gösterebilmektedir (Erdoğan 2004).

Çok büyük oranda SiO_2 ve Al_2O_3 içermekte olan camsı yapıyla granüle yüksek fırın cürufları öğütüldüğü takdirde ince taneli duruma getirilerek doğal puzolanlar ve uçucu küller gibi benzer özellikleri gösterebilirler. Büyük oranda CaO içermesinden dolayı YFC'nun bağlayıcı özelliği de bulunmaktadır (Huanhai *et al.* 1993; Collins and Sanjayan 2000). Hidrolik bağlayıcı madde olarak kullanılabilmesi için kalsiyum

hidroksitle sulu ortam halinde birleştirilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda çimento üretiminde kullanılması durumunda cürufllu çimento olarak kullanılarak beton katkı maddesi gibi kullanılabilir (Erdoğan 2016).

İnce taneli yüksek fırın cüruflarının kalsiyum hidroksitle ve suyla karışımından elde edilmiş bağlayıcılık özelliği 1774 yılından beri bilinmekte olmakla yanı sıra bu bağlayıcı malzemeyle 1869 yılında Paris metrosu inşaatında kullanılmıştır. Portland çimentosunun klinkeriyle öğütülerek kullanılan yüksek fırın cürufları eskiden kullanılan bir yöntemdir. Almanya ve ABD’de sırasıyla 1892 ve 1896’da üretilmiştir. Şu anda bazı ülkelerde bu yöntem kullanılmaktadır (Mielenz 1983; Virgalitte *et al.* 1995).

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun betonda katkı maddesi olarak kullanılması halinde bir çok yararlar sağlanmaktadır. Yüksek fırın cüruflarının ayrı öğütmesinde istenilen inceliğin elde edilmesi sağlanmaktadır. Granüle yüksek fırın cürufları klinkerden daha serttir. Yüksek fırın cürufunun depolanması çimento cürufundan daha kolay ve avantajlıdır. Yüksek fırın cüruflarını istenilen ölçüde öğüterek istenilen kalite beton elde edilmektedir (Roy 1982; Erdoğan *et al.* 2000).

Yüksek fırın cürufunun betonda kullanıldığında betonun dayanımını olumlu etkilemektedir. İnce taneli olarak öğütülerek betonda kullanılan yüksek fırın cürufları betonun porozitesini azaltarak rötreyi azaltmakta ve bu da geçirimsizliği azaltmaktadır. Betonda geçirimsizliğin azaltılması beton dayanımını olumlu yönde etkilemektedir (Arslan 2001).

YFC’nin çimento yerine belirli miktarda kullanılması durumunda erken zamanlarda beton dayanımları düşebilir. Fakat, 28 günlük yaştan sonra dayanımı artarak yükselmekte ve çimento ile üretilen betonlardan daha yüksek basınç dayanımları elde edilebilmektedir (Erdoğan 1997; Tokyay ve Erdoğan 2003).

YFC betonda kullanıldığı zaman taze beton işlenebilme özelliği artmaktadır. YFC ince taneli öğütülerek betona katıldığı için betonda ince madde hacmini arttırarak, iri taneli

maddeleri hareketini de kolaylaştırmaktadır. YFC çimentoya göre daha geç ve yavaş reaksiyonlara girebildiği için betonun priz süresinin artmasına sebep olabilmektedir. Daha çok sıcak hava durumlarında beton dökümü zamanı daha avantajlı olmaktadır. Ancak soğuk hava durumlarında YFC ile yapılan betonlarda ilave olarak priz hızlandırıcı kullanılması gerekmektedir. Ayrıca YFC çimento yerine kullanıldığı zaman betonda kullanılan çimento miktarı da azalmaktadır ve aynı zamanda betonun hidratasyon ısısının azalmasına neden olmaktadır (Erdoğan 1997; Tokyay ve Erdoğan 2003). Farklı ülkelere göre yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonları (Bilim 2006)

	Amerika ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye	Portland Çimentosu
CaO	29-50	30-40	38-44	34-41	60-67
SiO ₂	30-40	30-36	33-37	34-36	17-25
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-19	3-8
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5	0.5-6.0
MgO	0-19	8-21	1-3	3.5-7	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	-
SO ₃	-	-	-	-	1-3

Beton karışımlarında ve deneylerde çimentosuz bağlayıcı elde etmek için yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıklar farklı alkalilerle aktive edilerek kullanılmaktadır.

Literatür çalışmaları dikkate alındığı zaman silika ve alümin içeren tüm malzemeler alkalilerle aktive edilerek kullanılabilir. Şimdiye kadar yapılan bir çok çalışmalarda kaolinitik killeri, uçucu kül, yüksek fırın cürufları alkalilerle aktive edilerek kullanılmıştır. Alüminosilikat malzemelerin yapısı alkali aktive edilmiş malzemelerin mekanik dayanımını etkilemektedir. En yüksek dayanımlar yüksek fırın cürufu gibi malzemelerin kullanımı ile ulaşılmaktadır (Aydın 2010).

2.1.3. Alkali aktivatörler

Eski Mısır’da sodyum karbonat ve kirecin birleşmesi şeklinde ilk çalışmalarını gördüğümüz alkali aktivasyonu üzerinde ilk bilimsel çalışmalar Alman kimyacı ve mühendis Kühl tarafından 1908 yılında sertleşmiş bir portland çimentosu ile silika ve alümina içeren katı malzemelerde yapılmıştır. Daha sonra Purdon 1940 yılında alkalilerle ilgili çalışmaları daha da geliştirmiştir (İsmail *et al.* 2014). Roy (1999)’a göre alkali çalışmalarının tarihçesi Çizelge 2.3’de verilmiştir (Kaya 2016).

Çizelge 2.3. Alkali aktive çalışmaları tarihçesi (Roy 1999)

Yazar isimleri	Yıllar	Açıklama
Feret	1939	Cüruf içerikli çimento
Purdon	1940	Alkali ve cürufun birlikte kullanımı
Glukhovsky	1959	Alkali çimentolarının deneysel geliştirilmesi
Fors	1983	Cüruf alkalilerin superakışkanlaştırıcısı
Langton and Roy	1984	Tarihi yapıların malzeme incelenmesi
Malolepsy and Petri	1986	Bileşimli cürufların incelenmesi
Malek <i>et al.</i>	1986	Cüruf içerikli çimentoların radioaktiflik içerebilir
Roy ve Langton	1989	Antik alkali benzerlikleri
Wu ve diğerleri	1990	Cüruf çimentolarının aktivasyonu
Roy ve Malek	1993	Cüruf çimentosu
Krivenko	1994	Alkali çimentolar
Wang ve Scrivener	1995	Cüruf ve alkali aktive edilmiş cürufun mikroyapısı

Alkali aktive edilmiş malzemeler esasen performansları yüksek malzeme olarak kullanılmakta bunun yanında bazen de nükleer ve zehirli atıkların korunması, yönetimi için kullanılabilir. Tehlikeli radyoaktif atıklarda bentonit, kaolinit vd killeri reaksiyon sonucunda dayanımı iyi olan monolitik katılar oluşmaktadır (Shi *et al.* 2003).

Birçok çalışma endüstriyel yan ürünleri ve doğal puzolanları alkali aktivatör ile aktifleştirerek çimentosuz harç ve beton üretilebileceğini göstermiştir. Bu çalışmaların çoğunda endüstriyel atık ürünlerden olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül alkalilerle aktifleştirilerek kullanılmıştır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda alkaliler bir çok puzolanlarla kullanılmıştır. Bunlara kaolin kili, uçucu küller, YFC, silis dumanı vd. puzolanları örnek gösterebiliriz (Pachecho *et al.* 2008).

Alkali ile aktive edilen puzolanlardan uçucu kül, daha büyük spesifik yüzey, daha yüksek puzolanik aktivite ve daha kompakt mikro yapı nedeniyle yüksek eğilme ve basınç dayanımlarına ulaşmıştır. Alkali aktive edilmiş uçucu küllü malzemelerin mikro yapısı çok kompakt ve az gözeneklidir (Rovnavik *et al.* 2016).

Literatür çalışmalarından hareketle aktivatör türüne bağlı olarak genelde karışımda oranı arttıkça basınç dayanımı artmakta ve yüksek performans göstermektedir. Ayrıca aktivatörlerin çözelti pH oranı çimento performansını ve dayanımını etkileyebilmekte örneğin Khale ve Chaudhary çalışmalarında pH'ı 14 olan deney numunelerinin pH'ı 12 olan deney numunelerinden daha yüksek dayanımda olduğunu (beş kat fazla) ve pH 13-14 aralığında yüksek dayanımlı geopolimer üretilebileceği sonucuna ulaşmışlardır (Fernandez-Jimenez *et al.* 1999). Ayrıca pH değerinin artması ve reaksiyonun hızlanması aktivatör oranının artmasına bağlıdır. Daha az pH yapışkan tarzı malzeme oluşmasına sebep olmakta ve yüksek pH olması durumunda monomer bağ oluşmaktadır.

Aktivatörlerin sıvı içinde yoğunlukları, oranları ve bileşen karışımları geopolimer bağlayıcısının özelliklerine etki etmektedir. Aktivatörlerin oranının arttırılması durumunda değişen reaksiyon hızı geopolimer özellikli malzemelere etki etmektedir.

Ayrıca yapılan deney çalışmalarında aktivatör oranlarının yüksek tutulması durumunda numunelerde erken dayanımların artması gibi sonuçlar tespit edilmiştir. Genellikle aktivatörlerin etkisi kısa sürede kendisini belli etmez ve daha çok uzun süreli zamanlarda olumlu yönde etki etmektedir. Sonuç olarak aktivatör tipine bağlı olarak oranı arttıkça dayanım da artmaktadır (Atiş *et al.* 2009).

Aktivatörler, silikat ve aluminatların hızlı bir şekilde yoğunlaşıp kristalleşmesine yardımcı olur. OH⁻ reaktivite için bir katalizör olarak hareket eder ve temel elementlerden metal katyon yapısı oluşturmayı sağlar. Uçucu kül ya da diğer puzolanlara alkali çözelti karıştırıldığında, oluşan bileşimler çabuk çözülür. Bunun bir sonucu olarak, bir mikro-kristalin, amorf veya yarı amorf yapı oluşmaktadır (Kaya 2016)

Alkali oranı ile ilgili yapılan çalışmada örneğin sodyum silikatlı hamurlarda işlenebilirlik alkali oranına bağlı olarak değişmekte, %4 Na⁺ içeren NaOH ile aktive edilen cüruflar normal priz özelliği göstermektedir. Lakin %7 oranından daha çok Na⁺ içeren numunelerde yalancı priz, %7 oranında sodyum karbonat karışımlarında ani priz gözlenmiştir. Sodyum silikat ise çimento yüksek fırın cürufllu karışımlarda ani prize benzer bir karakter göstermiştir. Kullanılan Na konsantrasyonunun artması ile dayanımın artması düşük ve işlenebilirlik özelliği de azalmıştır. Bu yüzden %4 Na konsantrasyonu kullanılması tavsiye edilmekte ayrıca sıcak kür uygulanmadan önce oda sıcaklığında bekletilmenin betonlarda büzölmelerin azalması noktasında etki gösterdiği belirlenmiştir (Bakharev *et al.* 1999).

Ayrıca aktive edilen malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri de önemlidir. Alkalilerin iyi bir reaktivite sonucu için amorf yapı özelliği ve kür süreci de önemli bir rol oynamaktadır (Zivica 2006).

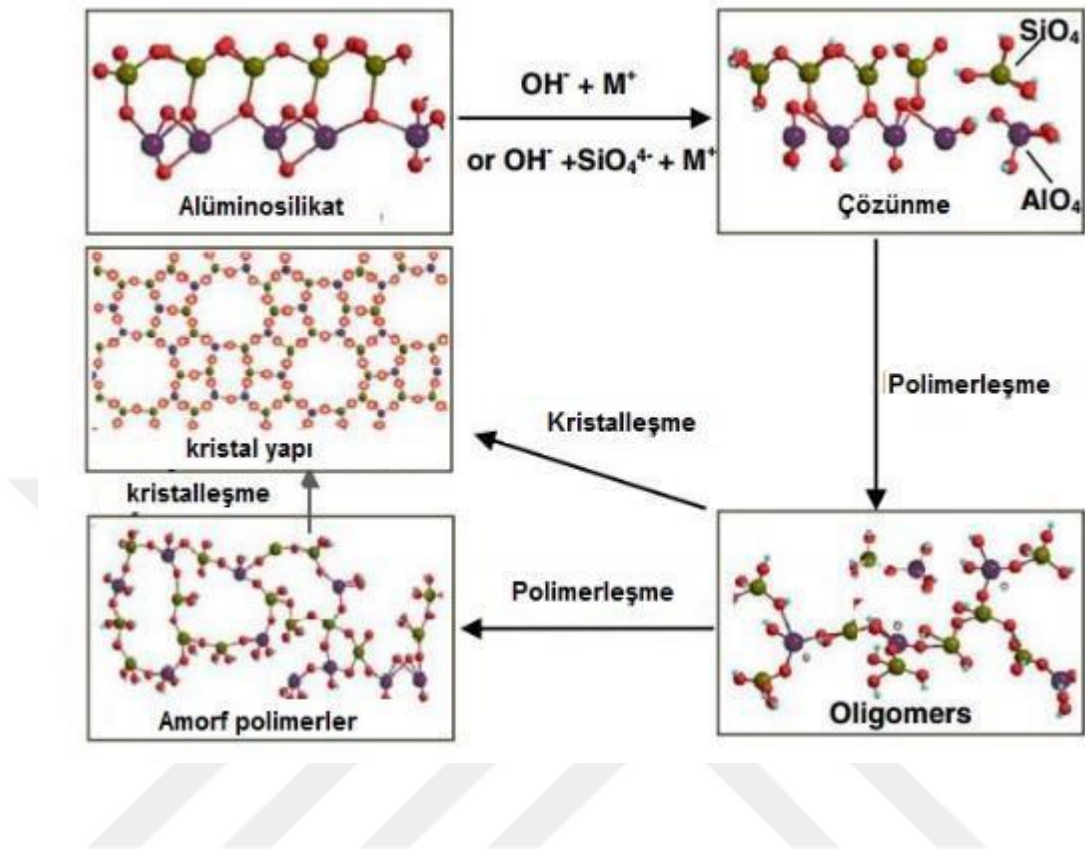
Bu parametrelerin yanında alkalilerin beraber kullanıldığı çalışmalardan olumlu sonuçlar alınmış, örneğin Na₂CO₃ ve NaOH aktivatörlerinin birlikte kullanılması durumunda ayrı kullanılan numunelerden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Li and Sun 2000).

Alkali aktivasyon mekanizması Si-O-Si bağları ve bu bağ yapısı içinde tüm Al atomlarının penetrasyonu ve sonucunda ise çoğunlukla alümina-silikat jeller oluşumu ile gözlenir. Bunların karışım karakteri $M_n[-(Si-O)_z-Al-O]_n \cdot wH_2O$ olarak formülleştirilir. Burada M alkalileri temsil eder. Dayanım kazanma açısından çimentolu malzemelerde hidrasyon ile C-S-H bileşenleri oluştururken geopolimerleşmede dehidroksilasyon ile dayanım kazanılır.

Alkali aktivasyonu sırasında oluşan molekül grupları Davidovits, 2008 tarafından aşağıda gruplandırılmıştır (Kaya 2016).

- a. Si-O-Si-O-siloxo, poly (siloxo) (camsuyu alakali-silikatlar) bağlayıcılık kazandırıcı hammadde
- b. Si-O-Al-O- sialate, poly (sialate)
- c. Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly (sialate-siloxo)
- d. Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly (sialate-disiloxo)
- e. P-O-P-O- phosphate, poly (phosphate)
- f. P-O-Si-O-Al-O-P-O- phospho-sialate, poly (phospho-sialate)
- g. (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone

Yao *et al.* (2009)'a göre alkali aktivasyon süreci genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir. Burada M^+ alkalileri, örneğin Na^+ ve/veya K^+ ; SiO_4^{4-} çözülmemiş silikayı göstermektedir (Zhang *et al.* 2015).



Şekil 2.3. Alkali aktivasyon tipik gösterimi (Zhang *et al.* 2015)

Alkaliler kostik alkaliler (alkali hidroksitler: MOH), silikatlar ($\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$), zayıf asitli tuzlar ($\text{M}_2\text{CO}_3, \text{M}_2\text{SO}_3$), alüminatlar ($\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$), alüminosilikatlar ($\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), güçlü asitli tuzlar (M_2SO_4) dır. Birlikte kullanılan aktivatörler NaOH , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 'ı örnek verebiliriz. En çok kullanılan aktivatörler ise hidroksitler ve sodyum silikatlardır. Alkali oksitlerin en önemli özellikleri karışım hazırlanmasında açığa çıkan ısıdır. Bazen ısı çevreye yayılarak buharlaşmakta ve bir süre sonra kaybolmaktadır. Bu yüzden ısı işlemleri dikkatle izlenmelidir (Petermann *et al.* 2010).

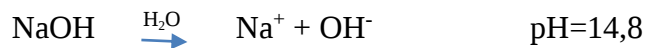
Genellikle aktifleştirme işleminde kullanılan alkaliler sodyum hidroksit (NaOH), sodyum meta silikat (Na_2SiO_3), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve potasyum hidroksit (KOH) çözeltileridir. Sadece çimento ile üretilen harç ve betonlara göre, alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, daha yüksek erken dayanım, daha düşük porozite, daha düşük hidrasyon ısı, kimyasal etkilere karşı daha iyi dayanıklılık, donma çözülme

etkisine karşı daha iyi dayanıklılık, daha kuvvetli matris-agrega ara yüzeyi ve daha iyi geçirimsizlik gibi önemli avantajlar gösterir. Alkali aktivatörlerden dolayı, ani priz, işlenebilirlikte azalma, daha fazla mikro çatlak oluşumu, daha fazla büzülme ve daha fazla çiçeklenme gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Shi *et al.* 2003).

Alkali aktivasyonunda en çok kullanılan hidroksitler; alkali oksitler, sodyum, potasyum gibi hidroksitlerdir ki bunlarında maliyeti yüksektir. Suda daha iyi çözünebilen ve çözünemeyen çeşitleri vardır. Mesela, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit suda daha iyi çözünebilir ve uçucu külün alkali aktivasyonu deneylerinde geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca suda daha çok çözünerek yoğun reaksiyon gösteren potasyum iyonları basınç dayanımı değerlerini de yükseltmektedir. Yine az miktarda sodyum hidroksitler düşük orandaki kalsiyum içeren uçucu kül ile birlikte iyi bir basınç dayanımı göstermektedir (Petermann *et al.* 2010). Klor-alkaliler de NaOH ve ağırlıklı olarak Cl_2 'den elde edilmektedir. Ayrıca potasyum hidroksit de potasyum klorürün hidrolizi sonucunda üretilmektedir.

Geopolimer gibi malzemelerin üretiminde alkali olarak en çok kullanılan hidroksit sodyum hidroksittir. NaOH ile aktive edilmiş geopolimerin kristal yapısının daha gelişmiş olduğu sülfat ve asitli ortamlara karşı daha istikrarlı olduğu söylenebilir. Fakat çok miktarda NaOH kullanılması daha erken zamanlarında daha iyi dayanımı sağlarken çözünmeyi hızlandırarak bağlayıcı oluşumunda sonradan görev alan CH yapısını olumsuz etkilemekte fazla oranda OH^- sebebiyle çözeltide istenmeyen morfoloji düzensizlikleri oluşmaktadır (Petermann *et al.* 2010).

Sodyum hidroksit; deney ve laboratuvar çalışmalarında, plastik, tekstil endüstrilerinde, farklı kimyasal ürün üretiminde kullanılmaktadır. Sodyum hidroksit saf halde beyaz ve katıdır. Sulu ortamda ayrışabilen sodyum hidroksit OH^- iyonunu serbest bırakmaktadır.



Karbondioksitler havada sulu bir ortamda çözülerek sodyum hidroksitlerle reaksiyon sonrası karbonatlar oluşturmaktadır.

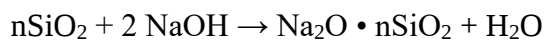


Yüksek fırın cürufları sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve diğer alkalilerle aktive edilerek bağlayıcı olan çimentonun yerine beton içinde kullanılabilmektedirler (Huanhai *et al.* 1993; Collins *et al.* 2000). Alkali aktivatörlü yüksek fırın cürufllu bağlayıcılar Avrupada, Çin ve diğer gelişmiş ülkelerde kullanılmıştır.

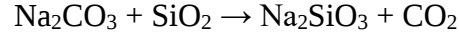
Hidroksitlerle birlikte potasyum ve sodyum silikat da alkali aktivasyonu çalışmalarında en çok kullanılan ürünlerdendir. Alkali silikatları çoğu zaman suda çözünebilen karbonat tuzları ile silika kalsinasyonlarının birleşimi ve CO₂ salınması sonucunda elde edilmektedir. Ayrıca alkalilerle aktive edilmiş numunelerin elde edilmesi esnasında karbonatların kalsinasyonları esnasındaki açığa çıkan CO₂ salınımlarının çimento üretimi zamanı CO₂ salınım miktarından çok az olduğu da literatürde incelenen bir tespittir (Granizo *et al.* 2007).

Alkali aktivatöründe bulunan hidroksil iyonlarının (OH⁻) cüruf içindeki alüminat ve silikat ağının çözülmesini ve hidrasyon hızını arttırdığı bilinmektedir. (Zivica 2006).

Aktivator olarak silikatlar; alkali silikatların yaygın türü olan sodyum silikatlar (nSiO₂Na₂O) formülüyle verilen ve bu kimyasal bileşiklerin ortak ismidir. Bu tip silikatların en yaygın ve en çok kullanılan türü Na₂SiO₃ formülüyle bilinen sodyum meta silikattır. Bazen cam suyu ve sıvı cam olarak da adlandırılan bu silikatlar saf halde renksiz ve beyaz renktedirler fakat bazı örnekleri farklı maddelerin oluşumundan dolayı çoğu zaman yeşilimsi ve mavi renktedirler. Bu silikatların sulu çözeltiler ve katılar içinde kullanılması öngörülmüştür.



Bu bileşenler çeşitli yerlerde kullanılmaktadır. Mesela, çimentolarda kullanılarak pasif yangın korumasında veya tekstil ve kereste işlerinde ve diğer alanlarda kullanılmaktadır. Sodyum silikat ve sodyum dioksitin oluşmasında sodyum karbonatın ve silikon dioksitin erimesi sebep olmaktadır.



Hem sodyum hem de potasyum silikatları, 1100 °C'den yüksek sıcaklıkta çözülebilen Na_2CO_3 veya K_2CO_3 için yüksek basınç dayanımı ve sıcaklık etkisinde kaynatılmasıyla elde edilen ve cam suyu adlandırılan aktivatörlerdir. Cam suyu aktivatörü NaOH ve KOH ile alkalileri yükseltip dayanımı artırmak için kullanılmaktadır (Kathirvel and Kaliyaperumal 2016).

Sodyum silikat çözeltileri farklı türlerde elde edilebilir. Fakat sıvı haldeki sodyum silikatlar toz şeklindeki sodyum silikattan daha yüksek dayanım göstermektedir. Genelde esas $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı 1,5-3,2 değerinde olmaktadır. Deney çalışmasında iyi çözünebilen silikatlı harçların basınç dayanımlarının çok az çözünen silikatlı harçlardan daha yüksek olduğu sonucuna varılmış bu tip silikatların agrega-bağlayıcı ara yüzeyi bağlantısına pozitif yönde etki ettiği görülmüştür. Birçok çalışmada sıcaklık arttıkça cam suyu kullanılmış numunelerde basınç dayanımı düştüğü, NaOH ve KOH numunelerinde ise daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir (Petermann *et al.* 2010).

2.2. Literatür Çalışması

2.2.1. Yüksek fırın cürufu ve alkali aktive içeren çalışmalar

YFC'nin puzolan olarak kullanıldığı çalışmalar literatürde çokca bulunmakta ve bu çalışmalarda üretilen yapı malzemelerinin hem dayanım hem durabilite özellikleri incelenmiştir. Örneğin,

Roy (1982) yaptığı çalışmada iki tür alkali aktivatörü kullanmıştır. Aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılmış ve üretilen numuneler sıcak kürleme işlemi yapılarak 65°C 'de 2 gün bekletilerek basınç dayanımı 2,3 MPa–39,6 MPa arasında olduğunu rapor etmiştir. Normal oda sıcaklığında bekletilen numunelerden 2 gün içinde sonuca ulaşılmamıştır. Ağırlıkça %4 Na_2O içeren ve $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranında 0,75 numuneler 7 MPa basınç dayanımına ulaşmışken, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranının 1,25'e ulaşması dayanım sonucunu 16 MPa kadar yükseltmiştir. Ağırlıkça %5 oranında Na_2O içeren numunelerde ise $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı 0,75 ve 1,25 için 22,1 ve 29,6 MPa basınç dayanımı rapor edilmiştir.

Collins and Sanjayan (1999) yaptıkları çalışmada yüksek fırın cürufunu alkalilerle aktive ederek kullanmışlardır. Bu beton numunelerinde dayanım 90 günlük numunelerde 60 MPa kadar ulaşmış ve elastite modülü azalmış, eğilme dayanımında 7 MPa eğilme değeri tespit edilmiştir. Ayrıca betonda alkalilerle aktive edilmiş YFC kullanılması durumunda kuruma rötresinin artacağı da rapor edilmiştir.

Fernandez-Jimenez (1999) yapılan bu çalışmada yüksek fırın cürufunu aktive etmek için aktivatör olarak sodyum hidroksitle cam suyu birlikte kullanılmıştır. 1 günlük basınç dayanımı sonucunun 40 MPa'dan 90 MPa'a yükseldiğini belirtmiştir. Optimum alkali aktivatör konsantrasyonunu cüruf kütlelerinin %3-5'i arasında NaO olarak bildirmiştir.

Bakharev *et al.* (1999) çalışmada YFC'nin cam suyu esaslı bir aktivatörle ($M_s=1,25$) en yüksek dayanımı verdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca optimum dayanımı %8 Na_2O

kullanarak elde edildiği sonucuna varılmıştır. Sodyum karbonat kullanılan numunelerde en iyi sonuç %7 Na₂O oranında olmuştur.

Bakharev *et al.* (2000) yaptıkları çalışmada alkali aktivatörü olarak Ca(OH)₂, NaOH, NaOH+Na₂CO₃, KOH ve Na₂SiO₃ (cam suyu) kullanılan çalışmada uçucu küllü geopolimerler aktive edilmiş ve incelenmiştir. En iyi basınç dayanımı sonucu sodyum silikatla aktive edilen numunelerde elde edilmiştir.

Fernandez-Jimenez and Puertas (2002) çalışmalarında alkali aktivatörünün optimum kullanım oranının yüksek fırın cürufu ağırlığının %3 ve %5 aralığında Na₂O olarak belirtmişlerdir. Bu değerlerden yüksek ve az kullanılması durumunda farklı durumlar ortaya çıkmıştır. Yüksek miktarda kullanıldığı zaman sertleşme ve çiçekleme gibi problemler çıkmaktadır. Az değerde kullanıldığı zaman ise aktivasyon üretimi gecikmektedir. Mekanik dayanımı etkileyen esas faktörler aktivatör oranı, aktivatörün tipi, kür sıcaklığıdır. Cam suyu aktivatör olarak kullanılan numunelerde reaktif silis agregaları kullanılarak portland çimentosunda oluşan alkali silika reaksiyonu incelenmiştir. Sonuç olarak aktivatörlü numunelerde çimentoya göre 4 defa az genişlemenin olduğu tespit edilmiştir. En önemli faktör ise aktivatörlerin tipleridir ve etkileri Na₂SiO₃+NaOH >> Na₂CO₃>NaOH gibi sıralanmıştır.

Bakharev *et al.* (2002) yaptığı deneysel çalışmada yüksek fırın cürufu numuneler üretmişler ve sülfata karşı dirençlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak yüksek fırın cürufu betonlarda sülfata karşı direnci büyük oranda iyi yönde etkilemiştir. Ayrıca alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu betonlarda sülfat etkisindeki basınç dayanımını da dikkate alındığı zaman %23 oranında azalma tespit edilmiştir.

Puertas *et al.* (2003) bu çalışmada alkali aktive edilmiş YFC'li betonda bulunan sonuçlara esas normal çimentolu betondaki donma-çözülmenin ardından ağırlık kaybının yakın olduğunu elde etmişlerdir. ASTM C 806-87 standardına göre büzülme testleri de yapılmıştır. Alkali ile aktive edilen yüksek fırın cürufu bu çalışmada YFC ile

ilgili olarak %50 oranında uçucu külle kombine halinde birlikte kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufunun kullanılması performansı da iyi etkilemiştir.

Chang (2003) yaptığı deneysel çalışmada alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cüruflarından harçlar hazırlamışlardır. Kullanılmış alkali aktivatörünün dışında hidratasyon oranı C/S oranına bağlı olarak değişebilen seviyelerde C-S-H oluştuğu belirtilmiştir. Ayrıca cam suyu ve NaOH oranına da bağlıdır. En iyi dayanım sonucu sodyum silikatlı numunelerde tespit edilmiştir.

Kwon (2005) yaptığı deneysel çalışmada yüksek basınç dayanımına sahip betonların alkali-agrega reaksiyonlarını inceleyerek yüksek fırın cürufunun önemini araştırmıştır. Çıkan sonuçlara göre yüksek dayanıma sahip betonlarda yüksek alkali içermesi sebebiyle alkali-agrega reaksiyonu kontrol veya normal betona göre daha yüksek olabilir. Büyük genleşmeleri önlemek için reaktif halde olmayan agrega kullanılabilir. Çimento miktarına göre %30 oranında YFC kullanılması durumunda yüksek dayanımlı betonda genleşmenin azalmasına neden olmuştur.

Fernandez-Jimenez and Palomo (2005) bu çalışmada 8 M NaOH ve %85 12,5 M NaOH + %15 NaSiO₂ aktivatörleri F tipi uçucu küllerle aktive etmişler ve 20 saat boyunca 85°C sıcaklıkta bekletilerek basınç dayanımında bir günde 70-80 MPa sonucuna ulaşmışlardır.

Zivica (2006) deneysel çalışmasında alkali aktivatörünün hidroksil iyonları önemli miktarda etki etmektedir ve bu da hidratasyonun işlemini arttırmaktadır. Bu iyonlar NaOH, KOH ve Na₂SiO₃ tipi alkalilerden kaynaklanmaktadır ve bu alkaliler farklı kimyasal reaksiyonlar sonucunda farklı ürünler oluşturmaktadırlar.

Granizo *et al.* (2007) yaptıkları çalışmada farklı spesifik yüzeylere sahip iki tip metakaolin, hidrotermal koşullar altında (85 °C, 2 saat), cam suyu Na₂SiO₃ ve Na (OH) içeren aktivatör (Na⁺ konsantrasyonları = 6, 8, 10, 12, 15, 18, 20) çözeltileri kullanmışlar ve iki metakaolin / çözelti oranı ile test edilen parametrelerin (aktivatör

konsantrasyonu ve MK / çözelti oranı) eğilme dayanımı üzerindeki etkisini ölçmek için regresyon analizi kullanılmışlardır. KOH çözeltisi basınç dayanımını arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Topçu ve Canbaz (2008) yüksek fırın cürufunu çimento yerine %0, %25, %50, %75, %85, %90, %95 ve %100 oranlarında kullanmışlar. YFC'nin inceliği 60 µm'den küçük kalacak şekilde seçilmiştir. 90 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarında en uygun oranının çimento miktarının yerine %75-100 aralığında alkali aktive edilmiş YFC kullanılmasının uygun olacağı görülmüştür. Deney sonuçlarına bağlı olarak yüksek sıcaklık etkisine basınç dayanımı %60, donma çözülme etkisine basınç dayanımının %40 avantajı sonucuna varılmıştır. Yüksek fırın cürufunu aktive etmek için aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat cam suyu kullanılarak harç numuneleri üretilmiştir. %4 oranında sodyum karbonat kullanılmıştır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılan harçlarda basınç dayanımlarında YFC kullanım oranı arttıkça %52'ye ulaşan oranlarda düşme görülürken, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat kullanılan harçlarda bu düşme oranı %61 civarlarında olmuştur.

Atiş *et al.* (2009) yaptıkları çalışmada cürufun karakterizasyonunun ardından, alkali aktif cüruf ile yapılan harç numuneleri hazırlamışlardır. Üç farklı aktivatör: farklı sodyum konsantrasyonlarında sıvı sodyum silikat (LSS), sodyum hidroksit (SH) ve sodyum karbonat (SC) kullanılmıştır. Alkali ile aktive edilen cüruf harcının basınç ve eğilme çekme dayanımı 7 gün, 28 gün ve 3 ayda ölçülmüştür. Harcın kuruma büzülmesi 6 aya kadar ölçülmüştür. Alkali ile aktive olan cüruf macunu ve PC macunu ayar süreleri de ölçülmüştür. LSS ve SH aktif cüruf pastalarının priz süreleri, PC hamurunun priz süresinden çok daha yavaş bulunmuştur. LSS ve SH aktif cüruf harçlarının SC aktif cüruf ve PC harçlarından daha kırılgan olduğu bulunmuştur. LSS ile yapılan cüruf harcı, PC harcının altı katı kadar yüksek bir kuruma rötresine sahiptir. Benzer şekilde, SH ile yapılan cüruf harcı, PC harcı ile üç katına kadar büzülmüştür. Bununla birlikte, SC ile aktive edilen cüruf harcı, PC harcına göre daha düşük veya karşılaştırılabilir bir büzülmeye sahiptir. Bu nedenle, SC'nin cüruf harcı için bir aktivatör olarak kullanılması tavsiye edilmektedir.

Kocabıyık (2010) çimento ile 45 µm tane boyutuna sahip yüksek fırın cürufunu ikameli olarak kullanmış ve çimento miktarına karşılık %30, %60, %90 oranlarında cüruf ekleyerek numuneler hazırlamış ve deneyler yapmıştır. En iyi sonuçlar 28 günlük basınç dayanımı için %30 oranında YFC içeren gruplarda 66 MPa dayanımla elde edilmiştir. Yüksek fırın cürufunu aktive etmek için aktivatör olarak sodyum hidroksit, kireç ve alçı kullanmıştır. En iyi sonuçlar 28 günlük basınç dayanımı %30 oranında 66 MPa rapor edilmiştir. Ayrıca %6 oranında kullanılan aktivatörlerden en iyi sonuç sodyum hidroksitte tespit edilmiştir.

Komljenovic *et al.* (2010) yaptıkları çalışmada karışımlarda çimento kullanmayarak yüksek cürufu aktive ederek farklı bir bağlayıcı madde kullanmışlardır. Aktivatör olarak sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Numunelerin 7, 28, 90 günlük basınç dayanımları incelenmiş ve ayrıca 6 aylık kuruma çatlak testleri yapılmış ve hidratasyon testleri incelenmiştir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksitle yapılan numunelerde harçlar gevrek, sodyum karbonatlı harçlar ise portland çimentosu gibi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca sodyum silikatlı harç numunelerinde dayanım artmış ve eğilmede çekme dayanımının da yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Yakupoğlu (2010) yaptığı çalışmada YFC çimento yerine %100 oranında kullanılmıştır. Ayrıca numuneler 28 gün kür edildikten sonra deneylerine başlanmıştır. Alkalilerle aktive edilen yüksek fırın cürufları üzerinde eğilme, basınç, aşınma, birim ağırlık vd. deneyler yapılmıştır. Kontrol betonuna göre en yüksek sonuç basınç dayanımı için 107,6 MPa fazla en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Eğilme dayanımı için ise bu değer 7,2 MPa olarak rapor edilmiştir. Alkali ile aktive edilen cüruflu harçlar, granüle yüksek fırın cürufunu sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum metasilikat ve sodyum silikat ile aktive edilerek çimentosuz olarak üretmiştir. Aktivatörler ağırlıkça cüruf miktarına göre %6, %8 ve %10 oranlarında seçilmiştir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen cüruflu harçların 35-40 MPa arasında basınç dayanımlarına ulaştıkları görülmüştür. Sodyum karbonat ile aktive edilen cüruflu harçlardan 28 gün sonunda en fazla 24,3 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Sodyum metasilikat ve sodyum silikatla aktive edilen cüruflu harçların (100 MPa'dan fazla) en yüksek basınç dayanımlarına

ulaştıkları görülmüştür. Sodyum hidroksitin, sodyum metasilikatın ve sodyum silikatın cürüflu harçlarda aktivatör olarak %6 oranında Na^+ konsantrasyonu kullanımının en ekonomik olduğu görülmüştür.

Aydın (2010) yaptığı çalışmada alkali aktivatörü olarak NaOH +Sodyum silikat kullanmıştır. Kullanılan aktivatörler YFC ağırlığının %2, %4, %6 ve %8'i oranında Na_2O miktarı olarak hesaplanmıştır. 28 günlük basınç dayanımında en iyi sonuç 78,4 MPa değeri ile %6 aktivatör oranında elde edilmiştir. En iyi eğilme dayanımı sonucu da yine %6 aktivatör oranında tespit edilmiştir.

Bondar *et al.* (2011) %4 ve %7 oranında Na konsantrasyonu içerecek şekilde sıvı sodyum silikat kullandıkları numunelerde betonun erken dayanımını iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca iki bileşenli $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ aktivatörleri cüruf ağırlığının %8'i oranında Na^+ konsantrasyonu olacak şekilde kullanılmıştır. Sodyum silikat kullanarak yapılan numunelerde daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Yang *et al.* (2012) bu çalışmada yüksek fırın cüruf ağırlığının %7,5 sönmüş kireç, %1 sodyum silikat ve %2 sodyum karbonat kullanılmışlar. 28. günün sonunda elde edilen basınç dayanım değerlerinde sodyum silikat kullanılan alkalili bağlayıcılar sodyum karbonat kullanılan numunelerden daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Chi (2012) yaptığı çalışmada yüksek fırın cürufunu aktive etmek için sodyum silikat alkalisi kullanılarak Na_2O oranını YFC ağırlığının %4, %5 ve %6'sı oranlarında tutmuş, doymuş kireç suyunda 60°C 'de kür uygulamıştır. Fosforik asit (H_3PO_4) kullandığı numunelerde basınç dayanımı, yarma dayanımı, kuruma büzülmesi değerlerinin ve yüksek sıcaklığa ayrıca sülfatlı sulara karşı direnç sağlamada da Portland çimentolarıyla kıyaslanabilir olduğunu gözlemlemiştir. 28 günlük basınç dayanımında en yüksek sonuç %4 oranında çimento/cüruf ile 50/50 karışımında 88 MPa, %6 oranında ise yine 50/50 karışımında 105,8 MPa elde edilmiştir.

Elibol (2012) yaptığı çalışmada karışımlarda yüksek fırın cürufunu aktive etmek için bağlayıcı olarak; çimento ve yüksek fırın cürufu kullanmış, aktivatör olarak; sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH), YFC kütlesinin %5'i kadar Na^+ molekülü olacak şekilde hesaplamıştır. Elde edilen sonuçlara göre en iyi özellikleri sodyum hidroksit alkali ile aktive edilen harçlar göstermiştir. Basınç ve eğilme dayanımına göre bir sıralama yapılırsa, sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum karbonat (Na_2CO_3) şeklinde sıralanmıştır.

Silva *et al.* (2012) yaptıkları deneysel çalışmada iki tip numune hazırlamışlar ve numunelerden biri uçucu kül-sodyum hidroksit ve uçucu kül-sodyum silikat olarak tasarlanmıştır. Numuneler 5 saat 80°C sıcaklıkta bekletilerek aktive edilmiş ve 28 günlük basınç dayanımın 24 MPa olan numune elde edilmiştir.

Bilim and Atış (2012) çalışmalarında $M_s=0,75$ olan NaOH ve Na_2SiO_3 aktivatörleri kullanmışlardır. Yüksek fırın cürufu çimento yerine sırasıyla %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında kullanılarak harç numuneleri yapılmıştır. Numuneler üzerinde basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Aktivatör ve yüksek fırın cürufunun artmasıyla eğilme ve basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği, aktivatör kullanılmayan yüksek fırın cürufu harç numunelerinin kontrol betonlarından daha yüksek performans gösterdiği gözlenmiştir.

Chi and Huang (2013) deneysel çalışmada rında uçucu kül/cüruf oranlarını 50/50, 30/70 ve 0/100 olarak almışlardır. 28. günlük basınç dayanımında en yüksek sonuç 50/50 karışımında 88MPa, 30/70 karışımında 105,8 MPa elde edilmiştir. Kütlece %4 Na_2O ve %6 Na_2O oranlarına uygun olarak $M_s=1$ ve su/bağlayıcı oranının 0.50 olan ik grup numune yapılmıştır. Geopolimerlerin, kuruma büzülmesi dışında, basınç ve eğilme dayanımı, su emme özelliklerinde, portland çimentolu karışımlardan daha olumlu sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Aktivatör kullanılan ve aktive edilen harçlardaki Na_2O oranının yükseltilmesi bağlayıcı özelliğinde artışa neden olmuştur. Gerekli karışım oranının kül/cüruf oranında 0,50 Na_2O miktarında ise %6 olduğu rapor edilmiştir.

Ryu *et al.* (2013) yaptıkları çalışmada uçucu külleri alkalilerle aktive edilerek beton numunelerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada F tipi uçucu küller aktive etmek için aktivatör olarak sodyum hidroksit NaOH ve sodyum silikat kullanılmıştır. Numuneler üzerinde ilk olarak 24 saat süresinde 60°C sıcaklıktaki fırında bekletilerek sonrada 1 gün süreyle 23±2°C kür yapılmıştır. 50x50x50 mm'lik küp numuneler hazırlanmış ve basınç dayanımı uygulanmıştır. En yüksek sonucun NaOH yüksek oranlarında erken yaşlarda yüksek basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Özodabaş (2014) yaptığı çalışmada yüksek fırın cürufunu %40, %60 ve %80 oranlarında tutarak deneysel çalışma yapmış ve incelemiştir. Yapılan 28 günlük basınç dayanımında en yüksek sonuç aktivatörün %6 oranında olduğu ve %40 YFC kullanılan numunelerde 36 MPa olarak elde etmiştir.

Nikolic *et al.* (2014) deneysel çalışmalarında Ms=3,2 olan Na₂SiO₃ ve 14 M NaOH yüksek fırın cürufuyla karıştırılarak 65°C sıcaklıkta 48 saat boyunca ısıtıl işlem görürerek aktive etme işlemi yapmışlardır. Sonrasında 14 gün normal ortam sıcaklığında bekletildikten sonra 600°C-800°C ve 1000°C yüksek sıcaklıkta bırakılmıştır. Sıcaklık uygulanmasından sonra ve önceki değerlerin karşılaştırılması sonucunda sıcaklığın artmasıyla basınç dayanımının da arttığı görülmüştür.

Zhu *et al.* (2014) çalışmalarında alkali aktivatörü kullanarak aktive edilen uçucu küller ve portland çimento karışimli harçlarda klorür geçirgenlik deneyi yapılmışlardır. Deneylerde uçucu küller %0-%40 oranında oluşturulmuş granüle YFC yerine kullanılarak üretilen numunelerin 0,6-0,8 su/bağlayıcı miktarında Ms =1 kabul edilen sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışım numunelerini 40°C sıcaklıkta bekletilerek aktive etme işlemi yapılmıştır. Numuneler hem 20°C hem de 65°C sıcaklıkta 1 ve 2 gün kür edilmişlerdir. Kür işlemleri bittikten sonra 14 gün bekletilerek 20×20×20 cm boyutlarında numunelerde mekanik dayanım ve klorür geçirgenliği incelenmiştir. Neticede, alkali aktive edilen uçucu kül numunelerinin klorür geçirgenliği çimentolu harç numunelerinden daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca poroziteyi %20-

40 oranında cürufun büyük miktarda etkilemediğinin ama klorür geçirgenliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Rakhimova and Rakhimov (2015) aktivatör olarak sodyum karbonat, sodyum silikat kullanmışlar ve 28 günlük basınç dayanımında en yüksek sonuç aktivatör oranının ağırlıkça %5'i oranında Na_2O içeren sodyum karbonatlı numunelerde 87 MPa sodyum silikatlı numunelerde ise 110 MPa ve üstü olarak elde etmişlerdir.

Rashad *et al.* (2016) yaptıkları çalışmada harçlarda ince agrega, kum yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarda yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Yüksek fırın cürufunun ağırlıkça %4 Na_2O olan Na_2SO_3 aktivatörü kullanılarak su/bağlayıcı oranını 0,30 olarak yapılmıştır. Numuneler 24 saat 50°C 'da ısıtılma maruz bırakılmış, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. Ayrıca numuneler 200°C , 400°C , 600°C ve 800°C sıcaklıkta 2 saat zamanda beklettikten sonra basınç dayanımları yapılmıştır. Beton içerisindeki yüksek fırın cüruflarının betonda basınç dayanımı arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Rovnanik *et al.* (2016) iki ayrı metakaolini 85°C altında 6, 8, 10, 12, 15, 18 ve 20 M Na konsantrasyonlarında Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltisi kullanarak aktive etmişlerdir. 100°C ısıda alkali aktivasyonu ile dayanıklı çimento bazlı malzeme üretilebileceği tespit edilmiştir. Bu aktivasyonla elde edilen bileşende kaolin miktarı, konsantrasyon ve özellikler incelenmiştir. Ayrıca alkalilerle aktive edilen YFC'li betonlarda çimentolu betonlara kıyaslamada düşük hidratasyon ısı, yüksek ve erken mukavemette daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Kılıçoğlu ve Çoruh (2016) yaptıkları çalışmada çimento ağırlığının %5, %15'i granüle yüksek fırın cürufu kullanarak alkali-silika reaksiyonu deneyleri, genleşme deneyleri yapmışlar ve çalışmada granüle yüksek fırın cürufu numunelerinde gereken limit değerlerin altında genleşmeler tespit etmişlerdir.

Ulu (2016) yaptığı çalışmada atık pet agrega, öğütülmemiş cüruf, agrega ile hacimce %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında yer değiştirilerek kullanmıştır. En iyi sonuçlar %60, %80 oranında elde edilmiş ve numunenin (22°C) 90 günlük basınç dayanım değerinin 77,42 MPa olduğu görülmüştür.

Kathirvel and Kaliyaperumal (2016) yüksek fırın cüruflarını geri dönüştürülmüş agregalarla kullanarak aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ seçmişlerdir. Normal ortam sıcaklığında kür edilen numuneler kontrol betonu ile yüksek fırın cürufllu aktive edilmiş harçların mekanik ve eğilme dayanımları test edilmiştir. Geri dönüşüm agregası kullanılan harçlar ve alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruflarının dayanımı arttırdığı tespit edilmiştir.

Zidol *et al.* (2017) deney çalışmasında cam tozu ve %30 uçucu kül-granüle yüksek fırın cürufu içeren beton karışımları hazırlamışlardır. Beton karışımları 0,35 ile 0,65 arasında değişen su/bağlayıcı oranına uygun yapılmıştır. Yapılan deneylerde basınç dayanımının ve klorür iyonu geçirgenliği klorür iyonu difüzyonu dahil dayanıklılık gibi mekanik özellikler değerlendirilmiştir. Yapılan deney sonucunda geçirgenliğin azaltılması açısından granüle yüksek fırın cürufunun F sınıfı uçucu küllerden daha iyi performans gösterdiği rapor edilmiştir.

Bingöl (2018) yaptığı çalışmada yüksek fırın cürufu (YFC) ile geopolimer harçlar üretmiştir. Sodyum meta silikat, cüruf miktarının %1, %2, %3, %4, %5, %6, %7, %8, %9 ve %10'u kadar sodyum içerecek şekilde 10 farklı oranda karışıma ilave edilmiştir. %8 sodyum oranında, sodyum meta silikatin direk katılması halinde suda kür edilen harçlarda 28 günde 9,86 MPa eğilme dayanımı, 90 günde 10,25 MPa eğilme dayanımına ulaşılmıştır. 28 gün suda kür edilen harçların basınç dayanımı 76,78 MPa, 90 gün suda kür edilen harçların basınç dayanımı 88,73 MPa olarak belirlenmiştir. Çimentolu kontrol harçlarının 28 günlük basınç dayanımlarına göre %40 oranında artış görülmüştür.

2.2.2. Cam atıkları içeren çalışmalar

Shayan (2002) çalışmasında %0, %10, %20, %30, %40 oranlarında cam tozu kullanmış ve en yüksek sonucu 28 günlük basınç dayanımı deneyi esas alındığında çimentonun ağırlıkça %30 cam tozu ile yer değiştirilerek kullanıldığı grupta 55 MPa olarak elde etmiştir.

Topcu and Canbaz (2004) yaptıkları çalışmada çimento yerine %15, %30, %45, %60 oranlarında cam tozu kullanarak yaptıkları basınç dayanımı deneyinde en yüksek sonucu %15 cam tozu içeren numunelerde 60 MPa olarak bulmuşlardır.

Park *et al.* (2004) beton için ince agregası olarak geri dönüştürülmüş atık camları %30, %50, %70 oranında kullanmışlardır. Basınç deneyi, çekme deneyi, alkali-silika reaksiyonu (ASR) genişlemesi deneyleri yapılmıştır. Atık camın her bir karıştırma oranı için (%0, %30, %50 ve %70) polimerin karışma oranı %5-%10 artarken, çekme mukavemetlerinde değişken değerler tespit edilmiştir. Sonuç olarak, betonda %30 oranının altında atık cam kullanımının uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Schwarz *et al.* (2007) çimento miktarının %10 oranında cam tozu içeren betonun dayanıklılık özelliklerini araştırarak klorür girişinin ve su geçirimsizliğinin azaldığını ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte, basınç dayanımında dökülen kontrol betonlarına göre daha yüksek sonuç elde etmişlerdir.

Shi and Zheng (2007) yaptıkları çalışmada, portland çimentosunda ve betonda atık camların kullanımını incelenmişlerdir. Kırılmış camların portland çimentolu beton için agregası olarak kullanılması betonun özellikleri üzerinde bazı olumsuz etkilere yol açmıştır. Şekilsiz olan ve nispeten büyük miktarlarda silika ve kalsiyum içeren cam, teorik olarak, tamamen öğütülmüş olduğunda puzolanik özellik gösterir. Böylece, Portland çimentosu betonunda çimento yerine kullanılabilir. Kırılmış camların Portland çimentosu betonu için agregası olarak kullanılması, betonun özellikleri üzerinde

bazı olumsuz etkilere sahiptir. Beton için kırılmış camların agrega olarak kullanılması konusundaki temel kaygılar, cam agregaların neden olduğu genişleme ve çatlamalardır.

Wang and Huang (2010) ürettikleri numunelerde çimento yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında cam tozu kullanmışlardır. Bu çalışmada %20 atık cam agrega içeren beton, en yüksek mukavemet özelliklerine sahip olduğu görülmüştür. 90 günlük basınç dayanımı deneyi sonucunda basınç dayanımı 75 MPa'a kadar ulaşmıştır.

Matos and Sousa-Coutinho (2012) %10 ve %20 oranında cam tozu ile ikame edilmiş çimento ile harçların dayanıklılık özelliklerini incelemiş ve su oranının değişmediğini, ayrıca klorür difüzyonunu düşürürken cam tozu katılımıyla karbonatlaşma direncinin azaldığını tespit etmişlerdir.

Khimri *et al.* (2012) yaptıkları çalışmada ürettikleri numunelerde %80 çimento %20 atık cam kullanarak 28 ve 90. günlerde yüksek basınç dayanım değerleri elde ederek %20 oranında cam tozu kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.

Xiao *et al.* (2013) yaptıkları çalışmada çimento yerine %0, %10, %20, %30 oranlarında tane boyutları ≤ 75 mikron inceliğinde olan cam tozu kullanmışlardır. Numuneler üzerinde 3, 7, 28, 90 günlük basınç deneyi, ASR incelemesi yapılmıştır. 90 günlük basınç dayanımı sonucunda en yüksek sonuç %30 cam tozu numunelerinde 70 MPa'ın üzerinde, 28 günlük basınç dayanımı sonucunda ise en yüksek sonuç %10 cam tozu numunelerinde 62 MPa olarak bulunmuştur.

Du and Tan (2013) çalışmalarında soda kireç cam tozunun puzolanik reaksiyonu ve %60'a varan yüksek çimento ikame oranlarında çimento kompozitlerinin mikro yapısı üzerindeki etkisini araştırılmışlardır. Mekanik ve dayanıklılık özellikleri, uzun vadeli performansı incelemek için değerlendirilmiştir.

Vijayakumar *et al.* (2013) yaptıkları çalışmada çimento yerine %10, %20, %30 ve %40 oranlarında cam tozu kullanmışlardır. Çalışmada üretilen numunelere 28 ve 60 günlük

basınç dayanımı deneyi yapılması sonucunda en yüksek sonuç %40 cam tozu numunelerinde 45 MPa olarak sonuçlanmıştır.

Sarıbıyık *et al.* (2013) yaptıkları çalışmada %10, %20, %30, %40, %47 oranında cam tozu kullanmışlardır. 90 günlük basınç dayanımı sonucunda en yüksek sonucu %30 cam tozu içeren numunelerde 110 MPa olarak bulmuşlardır.

Jani and Hogland (2014) atık camların çimento ve betondaki farklı kullanımları ve cam özelliklerinin çimento ve betonun performansı ve dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı çeşit camların dışında soda-kireç camını %30 oranında kullanılmışlardır. 90 günlük deney sonucunda basınç dayanımı normal betondan %8 daha yüksek çıkmıştır. ASR testi sonucunda normal betondan daha az çatlaklar oluştuğu belirtilmiştir.

Vaitkevicius *et al.* (2014) yaptıkları deneysel çalışmada çimento yerine %30 ve %70 oranlarında cam tozu kullanarak bu çalışmada mikro yapı analizi, X-ray incelemesi, 7 ve 28 günlük basınç deneyleri yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda %30 ve %70 oranında 100 mikron boyutunda cam tozlarının basınç dayanımını sırasıyla 32 MPa'dan 60 MPa'a yükselttiğini göstermişlerdir.

Kushartomo and Sulaiman (2015) %10, %20, %30 oranlarında cam tozu kullanarak ve 250 °C sıcaklık etkisinde özelliklerini inceledikleri çalışmalarında elde edilebilecek maksimum basınç mukavemeti değerinin %20'lik cam tozu içeren RPC'de 136 MPa olarak tespit etmişlerdir. Çimento ağırlığının %20'i oranında cam tozunun kullanılması tavsiye etmişlerdir.

Altynova *et al.* (2015) çimento yerine %10 ve %15 oranında cam tozu kullanarak 14 ve 28 günlük basınç deneyi yapmışlardır. 28 günlük basınç dayanımı deneyinde %15 cam tozu kullanılarak ürettikleri betonların basınç dayanımı kontrol betonuna göre çok daha yüksek sonuç vermiştir. Sonuç olarak %15 cam tozu kullanılmış betonların basınç dayanımının kontrol betonu basınç dayanımından %10 kadar yüksek çıkmıştır.

Orhan ve Şahin (2016) yaptıkları bu çalışmada çimento yerine %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında cam tozu kullanılarak numuneler üretmişlerdir. Cam tozları, katkı maddesi olarak numunelere ilave edilmiş ve beton numuneler üretilmiştir. Üretilen beton numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi, basınç dayanımı etkisi incelenmiştir. Numuneler $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de 7, 28, 90 gün standart su küründe bekletilmiş ve kür uygulanmış numuneler 100°C , 300°C , 600°C ve 900°C sıcaklıkta basınç dayanımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, erken yaşlardaki cam tozu kullanılmış betonun 600°C ve 900°C sıcaklıklardaki basınç dayanımı, kontrol betonuna göre daha iyi sonuçlanmıştır. Ayrıca öğütülmüş cam tozunun optimum kullanım oranının %10 oranında olduğu tespit edilmiştir.

Han *et al.* (2016) borosilikat cam atıklarının betonun basınç dayanımı ve radyasyon özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Borosilikat camının, çimento hamurunda radyasyon koruma özelliklerini iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda mekanik ve optik özelliklerini iyileştirdiğini görmüşlerdir. Borosilikat cam sertleşme süresini ve çimento karışımlarının ana mineralojik bileşimlerini etkilediği görülmüştür.

Omran and Tagnit-Hamu (2016) yaptıkları çalışmada betonda çimento yerine sırasıyla %10, 20, 30 oranlarında cam tozu kullanmışlardır. 7, 28, 91 günlük basınç deneyleri yapılarak sonuçlar incelenmiştir. Deney sonucunda normal betona göre 7 günlük basınç mukavemetinde %7 oranında, 28 günlük mukavemetinde, ise %35 oranında ve 91 günlük mukavemetinde ise %4 artış olduğu tespit edilmiştir.

Soliman and Tagnit-Hamou (2016) yaptıkları çalışmada %20, %40, %50, %100 oranlarında cam tozu kullanarak numuneler üzerinde 1, 2, 7, 28, 56, 91 günlük basınç deneyleri yapılmışlardır. En iyi sonucun 91 günlük basınç dayanımı deneyinde %50 oranında cam tozunun kullanıldığı numunelerde 175 MPa basınç dayanımının üzerinde sonuçlar elde etmişlerdir. Taze beton özellikleri açısından çimento ve kuvars tozu, emici olmayan cam tozu (CT) parçacıkları ile değiştirildiği zaman olumlu geliştiği gözlemlenmiştir. Performansın artması CT'nun puzolanik özelliğine ve mekanik performansına bağlı olduğu belirtilmiştir. Mikroskobik incelemesi sonucunda, çimento

ve cam tozu parçacıkları çevresinde bir hidratasyon yüzeyin oluşumunu ortaya çıkarmışlardır.

Aliabdo *et al.* (2016) yaptıkları deney çalışmasında %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında cam tozu kullanmışlardır. Çalışmada çimento yerine %10 oranında cam tozunun kullanılması, basınç dayanımını %9.0 arttırmıştır. En iyi sonuç 28 günlük basınç dayanımı deneyinde %10 oranında cam tozu kullanılması sonucu elde edilmiş ve 45 MPa olarak belirlenmiştir.

Islam *et al.* (2017) yaptıkları deneyde CEM I 42,5 çimento, %0- %25 cam tozu kullanarak hazırladıkları numunelerin 180 ve 365 günlük basınç dayanımı değerlerine bakmışlardır. Deney sonucunda 180 ve 365 günlük basınç dayanımının %20 oranda cam tozu içeren beton numunelerinde ve artış oranının ise %10-%14 aralığında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yapılan 28 günlük basınç dayanımı sonucunda 28. günde 35 MPa beton basınç dayanımı sonucu da tespit edilmiştir.

Zidol *et al.* (2017) çalışmada %0, %20 ve %30 cam tozu içeren ve %30 uçucu kül-yüksek fırın cürufu içeren beton numuneler üretmişlerdir. Çalışmada ele alınan beton karışımları 0,35 ile 0,65 su / bağlayıcı oranına sahiptir. Basınç dayanımı ve klorür iyonu geçirgenliği klorür iyonu difüzyonu dahil dayanıklılık gibi mekanik özellikler değerlendirilmiştir. Sonuçlar, cam tozunun uçucu küllerin kullanıldığı numunelerle benzer mekanik özellikler üzerinde etkiler geliştirdiğini ve geçirgenlik azaltması açısından granüle yüksek fırın cürufunun F sınıfı uçucu küllerden daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Cam tozu kullanılan numunelerde betonun klorür geçirgenliğini önemli ölçüde azalmış ve bu da beton dayanıklılığının iyileştirilmesini sağlamaktadır. 6-7 yıl süren uzun süreli deneylerden, alınan sonuçlarda cam tozu kullanılarak yapılan deneylerde numunelere esasen beton performansında artış tespit edilmiştir.

Du and Tan (2017) çalışmada betonda çimento yerine %15, 30, 45, 60 oranlarında cam tozu kullanarak beton numuneleri üretmişlerdir. Yapılan 7 günlük basınç deneyi

sonucunda değerler düşük olmasına rağmen daha uzun süreli yaşlarda (28 ve 90 günlük basınç dayanımı deneylerinde) normal betona göre daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Lu *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada %10, %20, %30, %40 oranlarında cam tozu ve 800C° sıcaklık etkisi uygulayarak deneysel çalışma yaparak ASR (alkali-silika-reaksiyonu) zelliklerini incelemişlerdir. Alkali silika reaksiyonunun incelenmesi sonucunda %20 oranında çimentonun yerine kullanılan ince taneli cam tozunun alkali-silika-reaksiyonu azalttığını tespit etmişlerdir.

Ali *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklıkta betonun mekanik özelliklerinin arttırılmasında atık cam tozunun etkinliğini araştırarak cam tozunun kimyasal bileşiminin, beton mukavemetinin iyileştirilmesinde iyi bir rol oynadığını ortaya koymuşlardır. %25 oranında cam tozu ve yüksek sıcaklık $\geq 200^{\circ}\text{C}$ uygulanarak deneyler yapılmıştır. 56 beton silindir ve prizma, yüksek sıcaklıkta basınç ve eğilme dayanımları, gerilme-şekil değiştirme davranışlarını ölçmek için üretilmiştir. 200°C sınırına ulaştıktan sonra her 100°C'lik sıcaklık artışı başına bu HSC'nin gücünde ortalama %16.15'lik bir azalma görmüşlerdir. Silis dumanından imal edilen HSC için çekme mukavemetinde %52'lik yüksek bir kayıp görülmüştür. 400°C'de silis dumanı ve cam tozundan yapılan HSC nümuneleri kontrol mukavemetine göre gerilme mukavemetindeki azalma sırasıyla %65 ve %25 rapor edilmiştir. Bu gerçek, silis dumanının da yüksek sıcaklıkta gerilme mukavemetinin azalmasında negatif rolünü göstermektedir.

Lee *et al.* (2018) imento yerine sırasıyla %10, %20, %30 oranlarında cam tozu kullanmışlar ve 7, 28, 91 günlük basınç deneyleri yapılmışlardır. %20 oranında cam tozunun kullanıldığı beton numunelerinde 90 günlük basınç dayanımı deneyinde yüksek sonuçlar tespit edilmiştir. Donmaya karşı direnç ve klorür iyonları nüfuzunun araştırılması, bu cam atıklarının bu özellikleri iyileştirmede daha iyi olduğunu göstermiştir.

Rodier and Savastano (2018) yaptıkları deneysel çalışmada çimento yerine %0, %10, %20 oranlarında cam tozu kullanmışlardır. En yüksek sonuçlar 28 günlük basınç dayanımı deneyinde tespit edilmiştir. Üretilen numunelerin dayanımları kontrol betonuna göre %7-%11 oranında artış göstermiştir. Çimento kütlesinin %20'sinin cam tozuyla yer değiştirerek kullanılması sonucunda en yüksek sonuç 40 MPa olarak tespit edilmiştir.

Bisht and Ramana (2018) numunelerde ince agrega olarak %18, %19, %20, %21, %22, %23 ve %24 oranında kullandıkları cam atıklı numunelerde 7, 28, 90 günlük basınç, su geçirimsizlik deneyleri yapmışlardır. En yüksek değerin cam tozunun %20 oranında olduğu betonda 28 ve 90 günlük deney sonucunda ulaşılmıştır. Oranın %21- %24 arası arttıkça basınç dayanımında azalma görülmüş, eğilme dayanımında aynı şekilde %20 oranı en yüksek sonucu vermiştir.

2.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Literatür gözönüne alınarak çalışmanın amaçları aşağıda sıralanmıştır.

1. Çevresel ve ekonomik açıdan kullanımı önemli olan YFC'nin alkalilerle aktive edilmesi amacıyla seçilen bir YFC optimum oranı için en iyi aktivatör oranı belirlenmesi amaçlanmıştır. Yaygın olarak kullanılan ve olumlu etkisi görülmüş olan sodyum karbonat Na_2CO_3 , sodyum silikat Na_2SiO_3 aktivatörlerinin kabul görmüş en iyi oranları seçilerek tekli ve karma etkisinin incelenmesi çalışmanın amaçlarındanıdır.
2. Betonda aktive edilmek istenen puzolanla beraber cam tozunun kullanılmasının beton performansı üzerindeki etkisini artırmak diğer bir amaç olup özellikle literatürde cam tozunun bu şekilde kullanımı ile alakalı çalışma çok sınırlı sayıdadır. Çalışmanın özgün değerini oluşturan bu amaçla alkali aktive çalışmalarının kapsamı ve malzeme çeşitliliğinin artırılması hedeflenmiştir.
3. Atık malzemelerle çimento tüketim miktarını azaltmak en temel hedeflerden biri olup olumlu sonuçlar alınması halinde çalışmanın çimentosuz yapı malzemesi üretimi hedefine yardımcı bir çalışma olması düşünülmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1 Çimento

Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen TS EN 197-1 (Anonim 2012b) ve TS EN 196-1 (Anonim 2016)'e uygun olan CEM II 32,5 R tip Portland çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de, fiziksel ve mekanik test sonuçları ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM II 32,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Çimento	16.87	4.35	3.02	56.39	1.97	2.39	0.22	0.63

Çizelge 3.2. CEM II 32,5 R çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri (Aşkale Çimento Fabrikası)

Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	Değerler
İncelik	45µm
Özgül ağırlık	2,91 g/cm ³
Özgül yüzey	4801cm ² /g
Priz başı (saat-dk.)	2saat-47dk
Priz sonu (saat-dk.)	3saat-34dk
Hacim genleşmesi	0,43mm
Basınç dayanımı (2 günlük)	21,34 MPa
Basınç dayanımı (28 günlük)	32,5 MPa (min)

3.1.2. Yüksek fırın cürufu

Çalışmada Trabzon Hekimoğlu Döküm Fabrikasının atığı olan yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Granüle ve toz halinde olmayan, karışık haldeki cüruf öğütme makinasında belli bir inceliğe kadar ($75 \mu\text{m}$) öğütülmüştür. Cürufun özgül ağırlığı 2.81gr/cm^3 , Blaine özgül yüzeyi ise $4250 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 'dir. Kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufları Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Öğütülmüş ince taneli YFC

Çizelge 3.3. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
YFC	36,7	14,2	1,0	32,6	10,1	1,0	0,4	0,8

3.1.3. Atık cam

Çalışmada kullanılan camlar Şekil 3.2’de gösterildiği gibi toplanarak Şekil 3.3’deki makinelerde maksimum tane boyutu 90 μm olacak şekilde öğütülmesi ile elde edilmiştir. Camların genel kimyasal özellikleri Çizelge 3.4’te verilmiştir. Öğütülmüş cam tozu kullanılmadan önce etüv kurusu haline getirilmiş ve daha sonra yeniden elenerek kullanılmıştır.

Şekil 3.4’de öğütülmüş camların önce kaba şekilde sonrasında ise ince tane boyutuna kadar öğütülmüş resimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Toplanan atık camlar

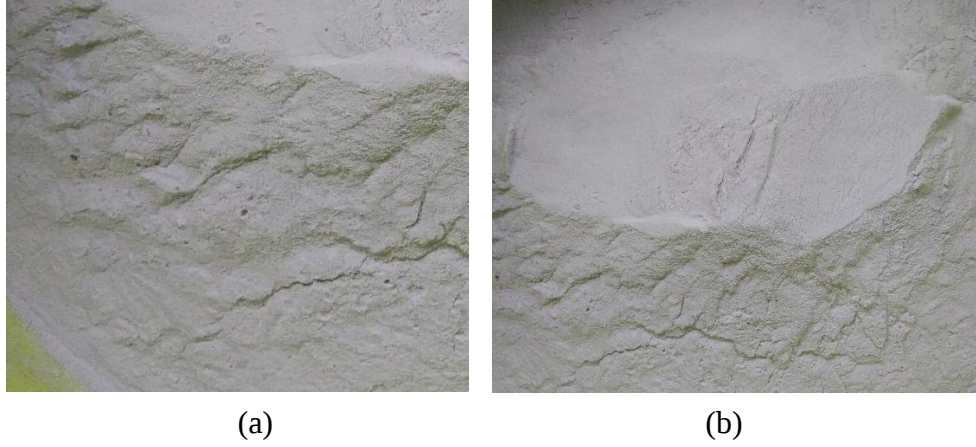


(a)



(b)

Şekil 3.3. (a),(b) Öğütme makinası



Şekil 3.4. (a),(b) Öğütülmüş cam tozu

Çizelge 3.4. Camların genel kimyasal bileşimleri

Kimyasal bileşimi	Oran (%)
SiO ₂	73,5
Al ₂ O ₃	0,4
CaO	9,2
Fe ₂ O ₃	0,2
MgO	3,3
Na ₂ O	13,2
K ₂ O	0,1
SO ₃	0,5

3.1.4. Agregalar

Deneylerde 0-2 ve 2-4 mm kum ile 4-8, 8-16 mm kırmataş agregası kullanılmıştır. Agregalar betonda önemli etkiye sahip olduğundan agregaların özelliklerinin kullanılmadan önce deneylerle belirlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden çalışma için agregası deneyleri yapılmış ve agregaların fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Deneyler TS EN 1097-1 (Anonim 2012a)'e uygun olarak tayin edilmiştir. Ayrıca elek göz açıklıkları da TS EN 933-2 (Anonim 1996a)'ye uygun olarak tayin edilmiştir. Agregaların tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayin edilmesi de TS EN 1097-

6'ya uygun yapılmıştır. Şekil 3.5'de ve Çizelge 3.5'de kullanılan agregalar gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.5. (a), (b), (c), (d) 0-2mm, 2-4mm, 4-8mm ve 8-16mm agregalar

Çizelge 3.5. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Agrega tipi	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme %
0-2mm	2,63	3,31
2-4mm	2,60	0,41
4-8mm	2,66	0,94
8-16mm	2,70	0,60

3.1.5. Aktivatörler: sodyum karbonat

Yüksek fırın cürufu için aktivatör sodyum karbonat Molar Kimya firmasından sağlanmıştır. Sodyum karbonat (soda) Na_2CO_3 formülündedir ve molekül ağırlığı 106.004 gr/mol değerindedir. Piyasada kalsine soda (Na_2CO_3) ve nadiren de kristal soda ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) halinde bulunur. Fiziksel görünümü katı ve beyazdır (Şekil 3.6). Sodyum karbonatın kimyasal özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. Sodyum karbonatın birim ağırlığı $2,54 \text{ g/cm}^3$ 'dür.

Çizelge 3.6. Sodyum karbonatın kimyasal özellikleri

Oksit	Asidimetrik	Cl	PO_4	SiO_2	SiO_4	N
%	$\geq 99,9$	$\leq 0,002$	$\leq 0,001$	$\leq 0,002$	$\leq 0,005$	$\leq 0,001$
Oksit	Pb	Al	Ca	Fe	K	Mg
%	$\leq 0,0005$	$\leq 0,001$	$\leq 0,0005$	$\leq 0,0005$	$\leq 0,01$	$\leq 0,0005$



Şekil 3.6. Kullanılan sodyum karbonat

3.1.6. Aktivatörler: sodyum silikat

Yüksek fırın cürufu için aktivatör sodyum silikat Özkimsan Kimya firmasından sağlanmıştır. Sodyum silikat $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ (3 modül sıvı sodyum silikat) formülündedir

ve molekül ağırlığı 122 gr/mol değerindedir. Sodyum silikat suda çözülebilen cam türüdür ve bu sebepten dolayı cam suyu da denir. Çalışmada kullandığımız sodyum silikat sıvı şeklinde, renksiz halde ve birim ağırlığı 1,42 g/cm³'dir. Sodyum silikatı renksiz ve berrak yapılı bir bileşendir. Çizelge 3.7'de sodyum silikatın kimyasal özelliklerini verilmiştir.

Çizelge 3.7. Sodyum silikatın kimyasal özellikleri

Test	Standart	Sonuç
Görünüş	Berrak, viskoz likit	Berrak
Bome Derecesi 20°C	min.40	40,68
Yoğunluk g/cm ³ , 20°C	min.1,382	1,39
Na ₂ O (%)	11,0-12,0	11,62
SiO ₂ (%)	22,0-24,0	23,06
Modül	2±0,2	1,98
Katı madde miktarı (%)	min 33,6	34,68
Fe miktarı (ppm)	max 80,0	30,0

3.1.7. Su

Beton üretiminde TS EN 1008 Standardı kapsamında olan (Anonim 2003) Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır.

3.1.8. Deneylerde kullanılan aletler

Elekler

Deneylerde, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, TS 1226 (Anonim 1996b)'ya uygun 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 25 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Deneylerde kullanılmış elekler

Kalıplar

Kalıplar Deneylerde, Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve 3.10’da gösterildiği gibi, TS EN 12390-1 (Anonim 2014)’e uygun boyutlarında silindir ve boyutlarında küp plastik ve metal malzemeden yapılmış beton kalıpları kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Deneylerde kullanılmış plastik küp kalıplar



Şekil 3.9. Deneylerde kullanılmış metal kalıplar



Şekil 3.10. 5x5x5cm küp kalıplar

Betoniyer

Çalışmada, Şekil 3.11’de gösterildiği gibi, ELE firmasının ürettiği 60 dm³ kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi betoniyer kullanılarak beton üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.11. Deneylerde kullanılmış betoniyer

Test presi

Harç ve sertleşmiş beton numunelerin basınç mukavemetlerinin belirlenmesinde İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik laboratuvarında bulunan ELE marka AUTOTEST 3000 tipinde 300 ton kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 3.12). Basınç deneyleri esnasında sabit bir yükleme hızı 0,4 MPa/sn alınmıştır. Bu yükleme hızı TS 12390-3 (Anonim 2012a)'da belirtilen aralık (0,2-1 MPa/s) içinde kalmaktadır.



Şekil 3.12. Hidrolik pres makinası

3.2. Yöntem

3.2.1. Numunelerin kodlanması

Numunelerin isimleri kısaltılarak kodlama yapılmıştır. Yüksek fırın cürufları Y, cam tozları CT, sodyum karbonat ve silikat ise NC ve NS olarak kısaltılmıştır. Karışım oranları yüzdesi rakamlarla verilmiştir. Örneğin, %7,5 yüksek fırın cürufu, %7,5 cam tozu, %1 sodyum silikat ve %1 sodyum karbonat içeren beton numunesi YCT7.5NS1NC1 olarak kodlanmıştır. Tüm grupların kodlamaları Çizelge 3.8’de verilmiştir.

3.2.2. Harç ve beton karışımlarının hazırlanması ve üretimi

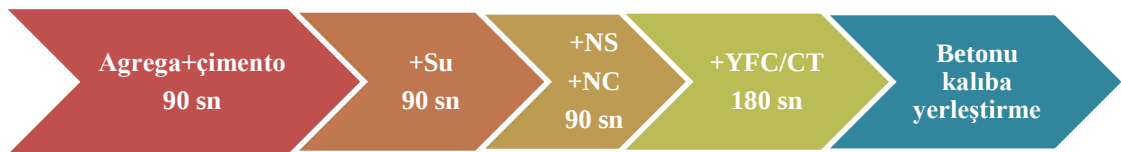
Aktivatörlerin kompozit üzerindeki etkisini daha iyi görebilmek ve belirleyebilmek amacıyla optimum alkali oranları ve karıştırma şeklinin belirlenmesi gerekir. Bu aşamada hassas çalışabilmek maksadıyla bu oranların harçlar üzerinde belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada literatür göz önünde tutularak en iyi ve en yüksek oranlar seçilmiştir. Bu tercih olası en sıkıntılı durumu görebilmek ve karışım parametrelerini belirlemede yardımcı olması içindir.

Literatürden hareketle aktivatör oranı belirlenmesi gereken en önemli parametredir. Literatürde en çok YFC miktarının %6’sı oranında Na⁺ konsantrasyonu içerecek şekilde aktivatör kullanıldığı yayınlar bulunmaktadır (Roy 1982; Bakharev et al. 1999; Chang 2003; Kocabıyık 2010; Yakupoğlu 2010; Aydın 2010; Chi 2012; Chi and Huang 2013; Özodabaş 2014). Bu bilgiden hareketle tüm aktivatörler bu oranda seçilerek ön deneme çalışmaları yapılmıştır. Ön deneme çalışmalarında tüm gruplardan 3’er adet 5×5×5 cm boyutlu harç numuneleri üretilmiştir. Fakat gruplarda özellikle NC’in bulunduğu numuneler üretilirken işlenebilme sıkıntısı ile karşılaşıldığından bu değerden daha düşük oranda Na⁺ konsantrasyonu kullanılmasına karar verilmiştir. Yine literatürden hareketle aktivatör oranı %2 ve %4 olarak seçilmiştir (Fernandez-Jimenez

1999; Fernandez-Jimenez and Puertas 2002; Bondar et al. 2011; Yang et al. 2012; Elibol 2012; Rakhimova and Rakhimov 2015).

Tüm aktivatörler toplam yüksek fırın cürufu ağırlığının %2'si ve 4'ü oranlarında Na⁺ konsantrasyonu içerecek şekilde kullanılmıştır. Beton numunelerde 0-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm agregaları kullanılmıştır. Toplam 15 grup numune üretilerek, her grupta 4 adet basınç ve 4 adet eğilme dayanımı deneylerinde kullanılmak üzere toplam 120 adet beton numune hazırlanmıştır.

Harçların hazırlanmasındaki sıralamada her bir grup için önce sırasıyla kum, agregalar ve çimento hassas şekilde tartılarak çelik kovalara koyulmuştur. Daha sonra cam tozu, yüksek fırın cürufu, sodyum karbonat, sodyum silikat tartılmış karışım için hazır durumda bekletilmiştir. Tüm tartım işlemleri hassas terazi ile yapılmıştır. Karışım mikserinin (betoniyer) içi tamamen yıkanarak temizlenmiş ve karışıma hazır duruma getirildikten sonra önce kaba agregadan inceye doğru dökülerek karıştırılmıştır. Yaklaşık her dökülen agregaya için karışım süresi 1,5 dakika belirlenmiş ve uygulanmıştır. Agregaya karışımından sonra çimento mikse dökülerek yaklaşık 1,5 dak boyunca karıştırılmıştır. Bilindiği gibi karışımlarda su yeterli oranda olmadığı zaman çimento hidratasyonu tam şekilde yapamayacak ve agregaların tanelerinde yüzeyi tam olarak ıslanmayacak ve bu halde agregaya tanesi ile çimento pastası arasında aderans da zayıf olacak ve yeterli şekilde işlenebilirlik de elde edilemeyecektir. Su ilave edilerek karıştırıldıktan sonra yüksek fırın cürufları (YFC), cam tozu (CT) ve sodyum karbonat eklenerek karışıma devam edilmiştir. Aynı işlemler sodyum silikatlı gruplar için de uygulanmıştır. Betonun üretim aşamaları Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Betonun üretim aşamaları

Basınç dayanımı deneyi için ön denemelerde 5x5x5 cm küp kalıpla, esas deneylerde ise 15x15x15 cm plastik küp kalıplar, eğilme dayanımı deneyleri için ise 7x7x28 cm ebatında çelik prizmatik kalıplar kullanılmıştır. Kalıplar yıkanıp temizlendikten sonra yağlanarak numune döküm işlerine hazırlanmıştır.

Deney numuneleri Çizelge 3.8’de verilmiştir. Ağırlıklar 1m³ için kg cinsinden verilmiştir. Hacimce 0,4 su/çimento oranı seçilmiştir. Deney numunelerinin karışım oranları Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.8. Deney grupları

	Kod numarası	Numuneler
1	Kontrol	K
2	Y15	%15YFC
3	Y15NC2	%15YFC+%2Na ₂ CO ₃
4	Y15NC4	%15YFC+%4Na ₂ CO ₃
5	Y15NS2	%15YFC+%2Na ₂ SiO ₃
6	Y15NS4	%15YFC+%4Na ₂ SiO ₃
7	Y15NS1NC1	%15YFC+%1Na ₂ SiO ₃ +%1Na ₂ CO ₃
8	Y15NS2NC2	%15YFC+%2Na ₂ SiO ₃ +%2Na ₂ CO ₃
9	YCT7.5	%15YFC+%7,5CT
10	YCT7.5NC2	%7,5YFC+%7,5CT+%2Na ₂ CO ₃
11	YCT7.5NC4	%7,5YFC+%7,5CT+%4Na ₂ CO ₃
12	YCT7.5NS2	%7,5YFC+%7,5CT+%2Na ₂ SiO ₃
13	YCT7.5NS4	%7,5YFC+%7,5CT+%4Na ₂ SiO ₃
14	YCT7.5NS1NC1	%7,5YFC+%7,5CT+%1Na ₂ SiO ₃ +%1Na ₂ CO ₃
15	YCT7.5NS2NC2	%7,5YFC+%7,5CT+%2Na ₂ SiO ₃ +%2Na ₂ CO ₃

Çizelge 3.9. Deney karışım oranları

Gruplar	Çimento,kg	Su, kg	Kum (0-2), kg	Kum (2-4),kg	Mıcır (4-8),kg	Mıcır (8-16),kg	YFC,kg	CT,kg	Sodyum Karbonat ,kg	Sodyum Silikat, kg
K	503	201	343	343	573	404	-	-	-	-
Y15	427	201	343	343	573	404	76	-	-	-
Y15NC2	427	201	343	343	573	404	76	-	3,5	-
Y15NC4	427	201	343	343	573	404	76	-	7,0	-
Y15NS2	427	201	343	343	573	404	76	-	-	4,03
Y15NS4	427	201	343	343	573	404	76	-	-	8,07
Y15NS1NC1	427	201	343	343	573	404	76	-	1,7	2,02
Y15NS2NC2	427	201	343	343	573	404	76	-	3,4	4,04
YCT7.5	427	201	343	343	573	404	38	38	-	-
YCT7.5NC2	427	201	343	343	573	404	38	38	1,77	-
YCT7.5NC4	427	201	343	343	573	404	38	38	3,5	-
YCT7.5NS2	427	201	343	343	573	404	38	38	-	2,02
YCT7.5NS4	427	201	343	343	573	404	38	38	-	4,04
YCT7.5NS1NC1	427	201	343	343	573	404	38	38	0,84	1,01
YCT7.5NS2NC2	427	201	343	343	573	404	38	38	1,7	2,02

Beton kalıba yerleştirildikten numaralanmıştır. Betonların tamamı bittikten sonra üzerleri kapatılmış ve dış etkilere korunarak bekletilmiştir (Şekil 3.14). Priz süresi ve bu süreci kontrol etmek için sık sık kontrol edilmiştir.



Şekil 3.14. Kalıba yerleştirilmiş numuneler

Numuneler kalıplardan 1 gün sonra çıkarılarak literatürden hareketle etüvde 1 gün 40°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Literatürde en iyi kür sıcaklığı bazı çalışmalarda 30 °C (Aliabdo *et al.* 2019), bazı çalışmalarda 40°C (Öztürk *et al.* 2019; Acevedo-Martinez *et al.* 2012), bazılarında ise 65°C (Payá *et al.* 2019; Nikolic *et al.* 2014) olarak alınmıştır. Bu değerler dikkate alındığında numuneler 1. gün 40°C’de bekletilmiş sonra 22±5°C sıcaklıkta deney anına kadar (60.gün) tutulmuştur. Basınç dayanımı deneylerinde 60. günün esas alınması hem kullanılan puzolanın ilerleyen yaşlarda yeni CSH jelleri oluşturarak etkisini göstermesi hem de literatürden hareketle alkali aktivatör oranı ve alkali türüne bağlı olarak aktivatörlerin olumlu etkilerini kısa sürede göstermemesinden dolayıdır. Şekil 3.15’te deney anına kadar bekletilen numuneler gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Hava kürü ortamında bekletilen numuneler

3.2.3. Numuneler üzerinde yapılan deneyler

Bu bölümde esas deney numunelerinin çökme, birim ağırlık, basınç ve eğilme dayanımı deneyleri açıklanacaktır.

3.2.4. Birim ağırlık deneyi

Betonların üretilmesi sırasında, kalıplara dökülmeden önce silindir şeklinde kaba doldurularak tartılmıştır. Tartıldıktan sonra kabın hacmi bulunmuştur. Ağırlık ve hacim belli olduktan sonra her grup için betonların birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Birim ağırlık deneyi TS EN 12350-6 (Anonim 2010a) standartına uygun yapılmıştır.

3.2.5. Çökme deneyi

Esas deney numuneleri için betonun kalıplara dökmeden önce taze beton karışımının ıslaklık derecesini ölçmek için kıvam testi de yapılmıştır. İşlenebilirliğin araştırılabilmesi için kullanılan deney yöntemlerinden çökme deneyi TS EN 12350-2 (Anonim 2010b) standartına uygun yapılmıştır. Türk standartına göre çökme deneyi

için kullanılacak alet metalden yapılmış olan koni huni ve içerisine dökülecek betonun şişlenmesi için şişleme çubuğu kullanılmıştır. Dökülen numune metal düzgün bir zemine yerleştirilmiştir. Şekil 3.16’da yapılan çökme deneyi gösterilmiştir.

Çalışma sırasında huninin 1/3 lük kısımları beton harcıyla doldurulduktan sonra 25 defa şişleme işlemi yapılmıştır. Huninin ağzındaki beton düzlendikten sonra huni düz bir şekilde ve yavaşça yukarı doğru çekilmiştir. Çekilen huni kalıptan çıkan betonun yanına koyularak çökme miktarı ölçülmüştür.



Şekil 3.16. Çökme deneyi aparatı

3.2.6. Basınç dayanımı deneyi

Deney numuneleri (15x15x15cm) TS EN 12390-4’e (Anonim 2012b) uygun olarak beton basınç presinde kırılincaya kadar 0,4 MPa/sn yükleme hızıyla yüklenmiştir (Şekil 3.17). Pres makinasının yüklemede başlık yüzeyleri temizlenmiş ve numunelerin başlıklara dokunacak yüzeylerinde herhangi bir çıkıntı veya pürüz olmamasına dikkat edilmiştir. Basınç dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.1)$$

f_c – Basınç dayanımı, MPa ve ya N/mm^2

A_c – En kesit alanı, mm²



Şekil 3.17. Basınç dayanımı deneyi

3.2.7. Eğilme dayanımı deneyi

Deneyler TS EN 12390-5'e (Anonim 2012c) uygun yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyi 7x7x28cm'lik prizma numunelerin yüzeyine yük uygulanması sonucunda yapılmıştır. Numuneler cihazın eksenine dik ve yan yüzeyine paralel olarak iki mesnet silindirin üzerine yerleştirilerek yük uygulaması yapılmıştır. Eğilme dayanımı, standartlara göre ve orta noktadan yük uygulanarak yapıldığı için aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f_{cf} = \frac{3FL}{2d_1d_2^2} \quad (3.2)$$

Burada,

f_{cf} – Eğilme dayanımı, MPa ve ya N/mm^2

F- Kırılma yükü (N)

L- Mesnet silindirleri arasındaki mesafe (cm)

d_1 – Numunenin en kesit boyutu (cm)

d_2 – Numunenin en kesit boyutu (cm)

Şekil 3.18’de eğilme deney sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Numunelerin eğilme dayanımı deneyi

Deney çalışmalarından bulunan sonuçlar, bulgular ve tartışma kısmında verilerek literatürle kıyaslamalı açıklamalar yapılmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde Materyal Metod kısmında verilen malzemeler karışım esaslarına göre üretilmiş deney numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçları verilmiş, ayrıca literatürle kıyaslamalı açıklamalar yapılmıştır. Deney numunelerinin birim ağırlık, çökme deneyi, basınç ve eğilme dayanımı deney sonuçları aşağıda detaylı olarak irdelenmiştir.

4.1. Numunelerin Fiziko-mekanik Deney Sonuçları

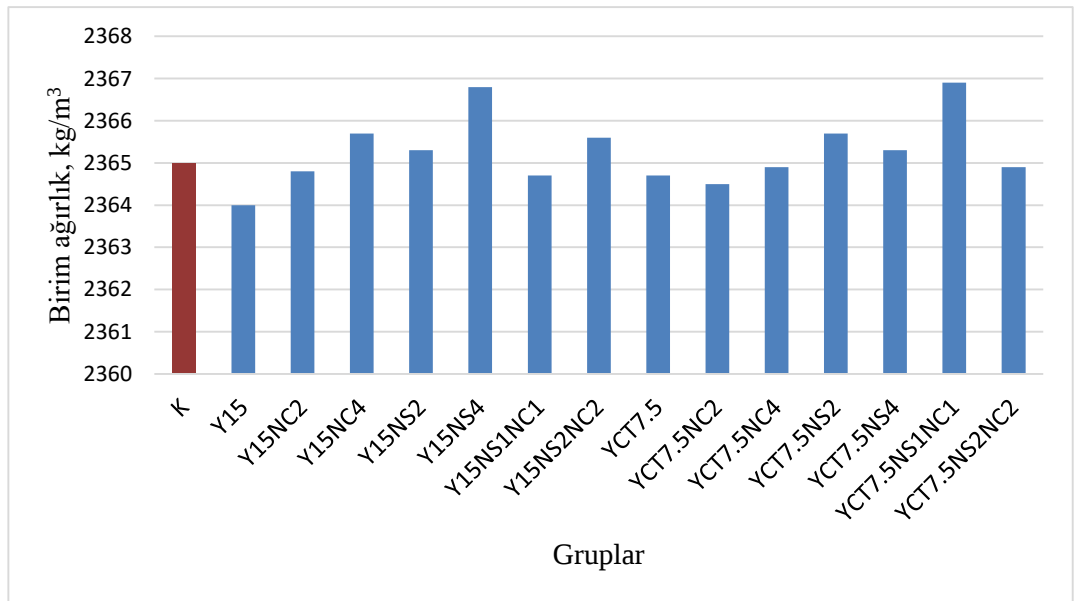
4.1.1. Birim ağırlık deney sonuçları

Deney numunelerinin birim ağırlıkları ve kontrol grubuna göre artış ve azalış oranları Çizelge 4.1’de ve Şekil 4.1’de verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre en düşük birim ağırlık Y15 grubunda en yüksek sonuç ise Y15NS4, YCT7.5NS1NC1 gruplarında elde edilmiştir. Değerler incelendiğinde çimento yerine kullanılan YFC, cam tozu ve alkali aktivatörlerin birim ağırlıkları çimentoya göre düşük olduğundan karışımlarda birim ağırlık değerlerinin genelde düşmesi beklenirken grupların birim ağırlık değerleri çok değişmemiştir. Sonuçlarda düşme oranının daha fazla olması beklenirken olmaması, çimento yerine eklenen malzemelerin kullanılma oranlarının düşük olmasından dolayı olduğu söylenebilir. Fakat bazı karışımlarda (Y15NS4, YCT7.5NS1NC1) birim ağırlığın artmış olması ise alkali aktivatör içeren karışımlarda oluşan ürünlerin birim ağırlığı artırıcı yönde değiştirdiğini ve oluşan yeni bağlar ve ürünlerin enstrümental analiz teknikleri ile irdelenerek birim ağırlık üzerine etkilerinin daha net ortaya konulması gerektiğini göstermektedir. Analizlerle saptanacak olan ürünler ve etkilerinin bu konuda yapılacak olan işlenebilirlik ve performans (dayanım ve durabilite) deneylerine önemli bir ışık tutacağı aşîkârdır.

Çizelge 4.1. Grupların birim ağırlık deney sonuçları

	Numuneler	Birim ağırlık, kg/m ³	Kontrole göre artış/azalış oranı (%)
1	K	2365	-
2	Y15	2364	-0,04
3	Y15NC2	2364,8	-0,01
4	Y15NC4	2365,7	0,03
5	Y15NS2	2365,3	0,01
6	Y15NS4	2366,8	0,08
7	Y15NS1NC1	2364,7	-0,01
8	Y15NS2NC2	2365,6	0,03
9	YCT7.5	2364,7	-0,01
10	YCT7.5NC2	2364,5	-
11	YCT7.5NC4	2364,9	0,03
12	YCT7.5NS2	2365,7	0,01
13	YCT7.5NS4	2365,3	0,01
14	YCT7.5NS1NC1	2366,9	0,08
15	YCT7.5NS2NC2	2364,9	-

**Şekil 4.1.** Grupların birim ağırlık grafiği

4.1.2. Çökme deneyi sonuçları

Deney numunelerinin işlenebilme-kıvam derecesini ölçmek için yapılan Slump Deneyi sonuçları ve kontrol grubuna göre artış ve azalış oranları Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en düşük çökme miktarı Y15 grubunda en yüksek sonuç ise YCT7.5NS2 grubunda elde edilmiştir. Kıvam değerleri S3 ve S4 sınıflarına girmektedir.

Bulunan değerlere dayanarak çimento yerine sadece YFC nin kullanıldığı gruplarda çökme miktarının azaldığı bu azalan etkinin aktivatörlerle bir değere kadar yükseldiği görülmektedir. Bu sonuç aktivatörlerin YFC’li betonlarda işlenebilme özelliklerini geliştirdiği şeklinde yorumlanabilir. Aktivatörlerden de en çok NS’nin kullanıldığı gruplarda en yüksek çökme değerini görebilmekteyiz. Aktivatörler kıyaslandığında NS, NC’ye göre çok daha iyi sonuçlar vermektedir.

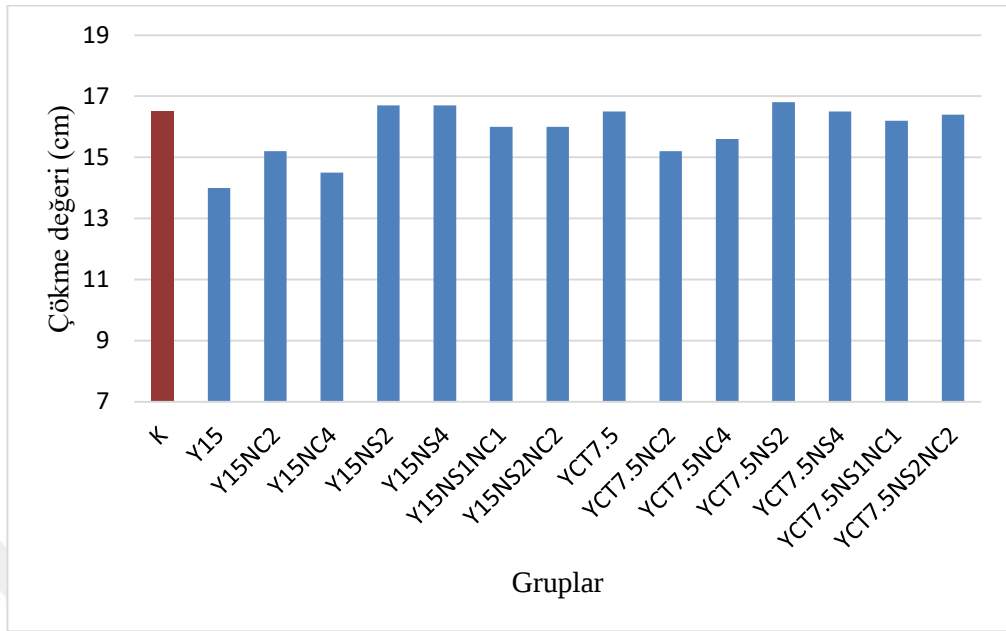
YFC ve CT içeren grup (YCT7.5) sadece YFC içeren gruba (Y15) göre işlenebilirliği artırmıştır. Burada CT’nin işlenebilirlik üzerine olumlu etkisi olduğu söylenebilir. Tane boyutu olarak YFC’nin CT’den daha küçük olması ve YFC’li numunelerde tane yüzeyinin artmış olması ile bu durum açıklanabilir. Yine aktivatörler kıyaslandığında çökmenin en çok NS’nin kullanıldığı gruplarda olduğunu görebilmekteyiz. Yani NS, NC’ye göre çok daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu durum NC’nin kullanıldığı gruplarda oluşan ürünler ve karışımın pH değerinden kaynaklanan farklı bir yapışma özelliği şeklinde görülmüş olup bu parametrelerin analiz teknikleri ile saptanması tavsiye edilmektedir.

Alkali aktive edilen çalışmalarda çimentolu gruplara nazaran taze halde daha farklı bir yapışkanlık özelliğinin görülmesi ve bunun kompozitin bileşen cinsi ve pH değerlerine bağlı olduğunu belirtmek gerekir. İşlenebilirlik özellikleri sade çimentolu gruplara göre bu açılardan farklılık gösteren kompozitler için yapışkanlık özelliği gözönüne alınarak segregasyon özelliklerinin de daha detaylı kıyaslanabileceği daha farklı işlenebilirlik ölçme testlerinin geliştirilmesi ve uygulanması gerektiği tavsiye edilmektedir. Taze

haldeki özelliklerden hareketle sertleşmiş haldeki özelliklerin belirlenmesinin kompozitler için çok önemli olduğunu hatırlayacak olursak alkali aktive edilen kompozitlerin bu noktada çok ciddi çalışmalara ihtiyacı olduğu görülmektedir. Kıvam değerleri S3 ve S4 sınıflarına girmektedir ve genel betonarme yapılarında, etkin vibrasyon uygulanabilen, vibratörlü genel şantiye betonlarında kullanılabilir.

Çizelge 4.2. Çökme deneyi sonuçları

	Numuneler	Çökme değeri, cm	Kontrole göre artış/azalış oranı (%)
1	K	16,5	-
2	Y15	14,0	-15,15
3	Y15NC2	15,2	-7,88
4	Y15NC4	14,5	-12,12
5	Y15NS2	16,7	1,21
6	Y15NS4	16,7	1,21
7	Y15NS1NC1	16,0	-3,03
8	Y15NS2NC2	16,0	-3,03
9	YCT7.5	16,5	-
10	YCT7.5NC2	15,2	-7,88
11	YCT7.5NC4	15,6	-5,45
12	YCT7.5NS2	16,8	1,82
13	YCT7.5NS4	16,5	-
14	YCT7.5NS1NC1	16,2	-1,82
15	YCT7.5NS2NC2	16,4	-0,61



Şekil 4.2. Deney numunelerinin çökme değeri sonuçları

4.1.3. Basınç dayanımı sonuçları

Deney numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları ve kontrol grubuna göre artış ve azalış oranları Çizelge 4.3'te, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.

Tüm grupların 60 günlük basınç dayanımı sonuçları kontrol betonuna göre daha yüksektir. En düşük dayanım değeri kontrol grubunda olmak üzere en iyi dayanım değeri YCT7.5 kodlu grupta (%7,5YFC+%7,5CT) ve sonrasında YCT7.5NS1NC1 kodlu karma aktivatörlü grupta tespit edilmiştir. Artış yüzdesi %46,6 gibi yüksek bir değerdir. Bu sonuç cam tozlarının basınç dayanımında oldukça iyi bir etkisinin olduğunu göstermekte, oluşan yapılar ve doldurucu etkinin gösterilmesinde analiz tekniklerine ihtiyaç duyulmasına rağmen, bu sonucun cam tozunun içeriğindeki SiO₂'nin etkisiyle puzolanik özellik gösterdiği ve kompozitin boşluklarında doldurucu etki yaptığı düşünülmektedir.

Alkali aktivatör oranı ve alkali türüne bağlı olarak olumlu etki kısa sürede gözükmemekte aktivatörlerin hızlı bir şekilde yapıda yoğunlaşıp kristalleşmesi özelliği de dayanımı olumlu etkilemektedir.

Gruplarda YFC'li numunelerin basınç dayanımını kontrole göre artırdığı, bu artışı aktivatörlerin tipine bakılmaksızın %2 oranında sağladığı, artan aktivatör oranında daha az dayanım kazandığı görülmektedir. Böylelikle kullanılan %2 aktivatör oranının kullanılması diğer çalışmalar için tavsiye edilmektedir.

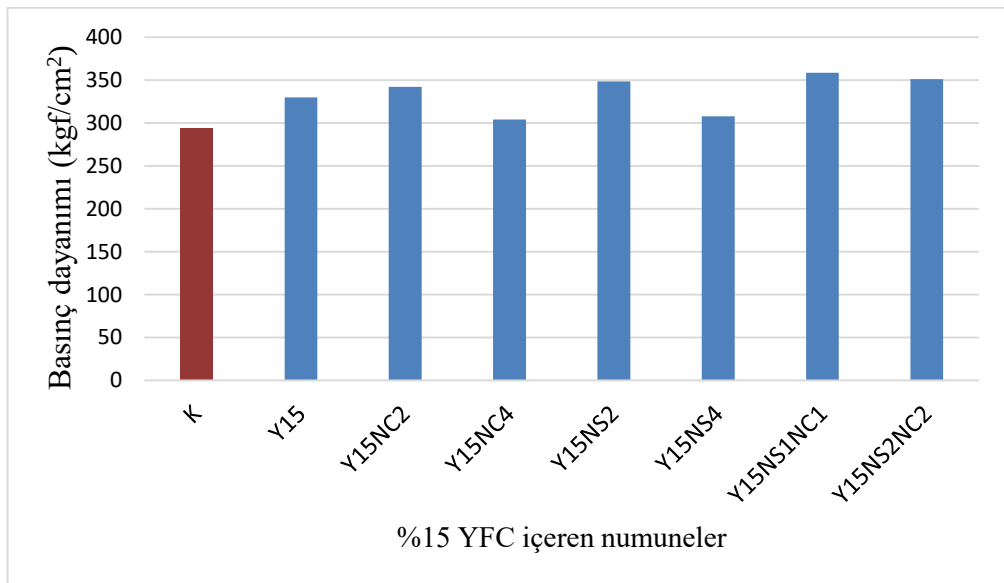
YFC'li ve CT'li gruplar sade YFC'lilere göre aktivatörlerin aynı tip ve oranları için tüm gruplarda daha yüksek dayanımlar göstermiştir. Buradan CT'nin alkali aktive edilmiş YFC'li kompozitlerde kullanımının olumlu sonuçlar doğuracağı görülmüştür. Bu sonucun CT'nin alkali aktive deneylerinde parametre olan Si-O bağına katkı sağlaması olarak düşünülebilir.

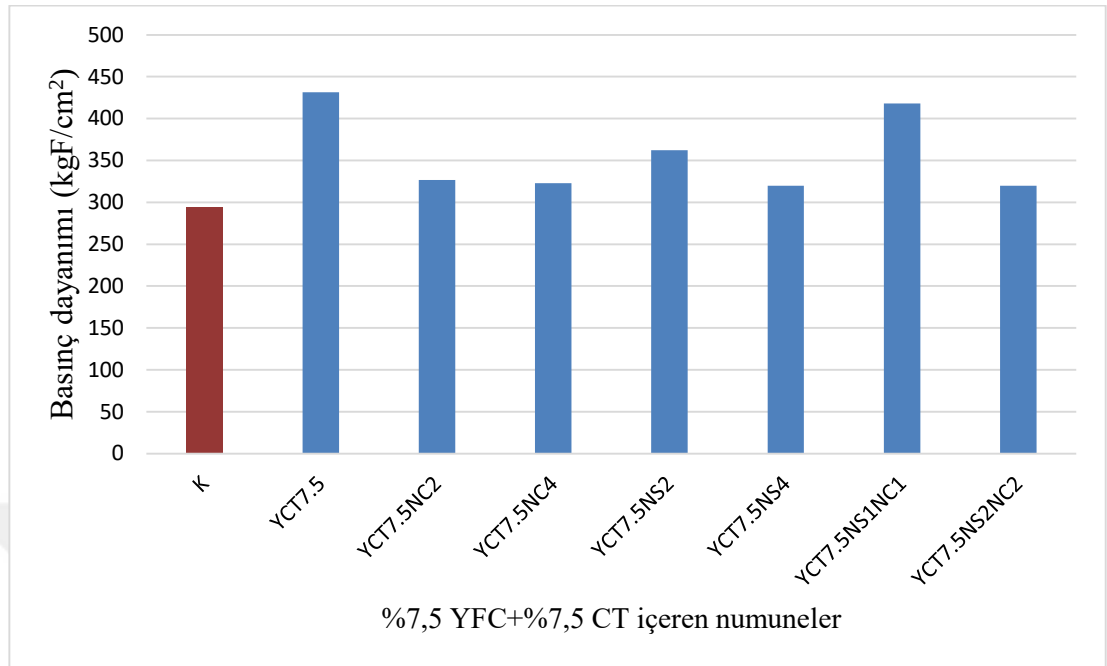
Basınç deneyi sonuçları incelendiği zaman YCT7.5 kodlu grup numunelerinden sonra en iyi sonuç YCT7.5NS1NC1 grubunda tespit edilmiştir. NS aktivatörlü numunelerin diğer aktivatöre göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenen sonuçlardandır. Bu sonuç literatürle uyumludur (Bakharev *et al.* 2000; Chang 2003; Komljenovic *et al.* 2010)

Y15, Y15NC2, Y15NC4 ve Y15NS1NC1 gruplarında çökme değeri azalmış olmasına rağmen dayanım artmıştır. NS içeren numunelerde işlenebilirlik azalırken dayanımın artması dikkat çeken bir husustur. Bu durum Bölüm 4.1.2'de anlatıldığı gibi alkali aktive edilmiş kompozitlerde işlenebilme-dayanım özelliklerinin belirlenmesinde yeni yöntemlere gerek duyulabileceği savımızı desteklemektedir. Bu durum YFC ve CT içeren numunler içinde aynıdır. Ayrıca NS aktivatörü işlenebilirliği de dayanımı da NC'ye göre artırmaktadır. Bu sonuçlardan hareketle aktivatör tipi işlenebilme-dayanım özelliklerini belirlemede en temel parametrelerden biridir denilebilir.

Çizelge 4.3. 60 günlük basınç dayanımı sonuçları

Gruplar	Ortalama Basınç Dayanımı kgf/cm ²	Kontrol betonuna göre artış-azalış oranı %
K	294,3	-
Y15	329,9	12,1
Y15NC2	342,1	16,2
Y15NC4	304,0	3,3
Y15NS2	348,5	18,4
Y15NS4	307,8	4,6
Y15NS1NC1	358,7	22,0
Y15NS2NC2	351,0	19,2
YCT7.5	431,5	46,6
YCT7.5NC2	326,8	11,0
YCT7.5NC4	322,7	9,7
YCT7.5NS2	362,2	23,1
YCT7.5NS4	319,9	8,7
YCT7.5NS1NC1	417,9	42,0
YCT7.5NS2NC2	319,7	8,7

**Şekil 4.3.** 60 günlük basınç dayanımı sonuçları (%15YFC)



Şekil 4.4. 60 günlük basınç dayanımı sonuçları (%7,5YFC+%7,5CT)

4.1.4. Eğilme dayanımı sonuçları

Eğilme dayanımı deney sonuçları 60 günlük numuneler üzerinde yapılmış, grupların ortalama deney sonuçları ve kontrol grubuna göre değişim miktarları Çizelge 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmiştir. Üretilen numunelerin basınç dayanımları ve eğilme dayanımları arasındaki korelasyonu görebilmek amacıyla değer grafikleri Şekil 4.7 ve 4.8’de verilmiştir.

Eğilme dayanım sonuçları incelendiğinde YCT7.5NS1NC1 kodlu grup kontrol grubuna kıyasla %91’lik bir artışla en yüksek değere sahiptir. Bu sonuç gözönüne alındığında karma aktivatör kullanımının kompozitlerin mekanik özelliklerini en iyi şekilde etkilediği belirlenmiş, bunun nedeninin olası aktivatör bileşenlerinin dayanımı artırıcı yönde ürünler ve bağlar oluşturduğu şeklinde açıklanması düşünülebilir.

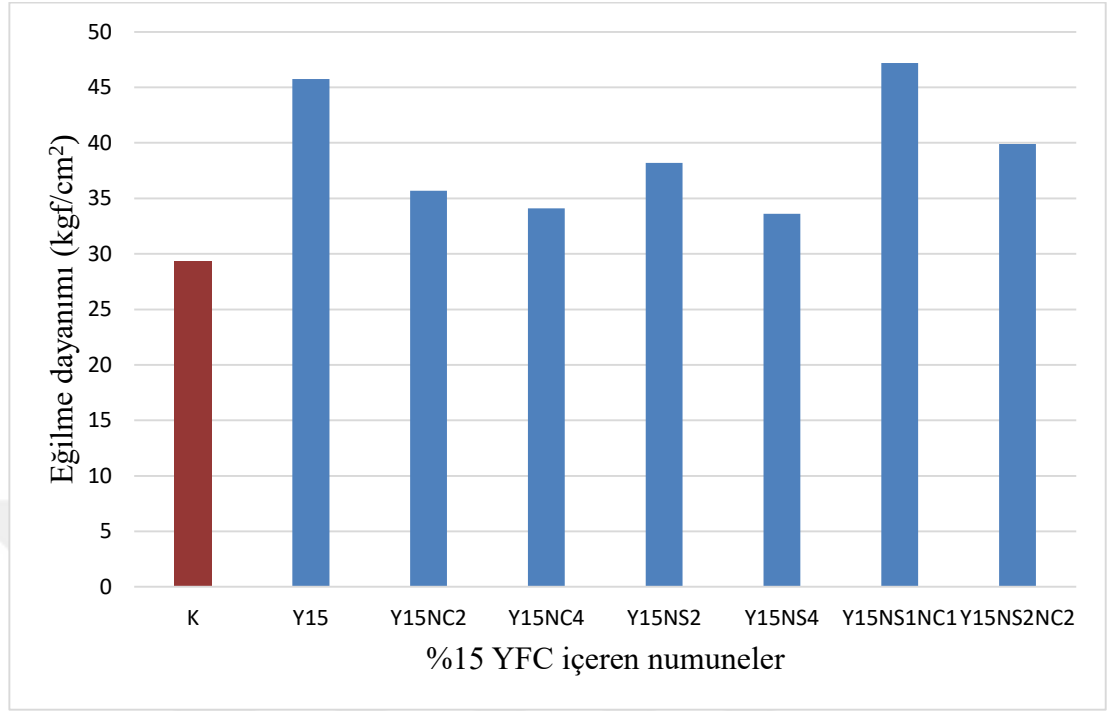
Genel olarak bazı CT’li gruplar (YCT7.5NC4, YCT7.5NS4, YCT7.5NS1NC1) hariç cam tozlu numunelerin eğilme dayanımlarını cam tozu olmayanlara göre azalttığı

söylenbilir. Aktivatör açısından basınç dayanımında olduğu gibi NS'li numunelerin dayanımları NC'li numunelerden daha yüksek çıkmıştır. Ama en olumlu sonuçlar karma gruplardan alınmıştır.

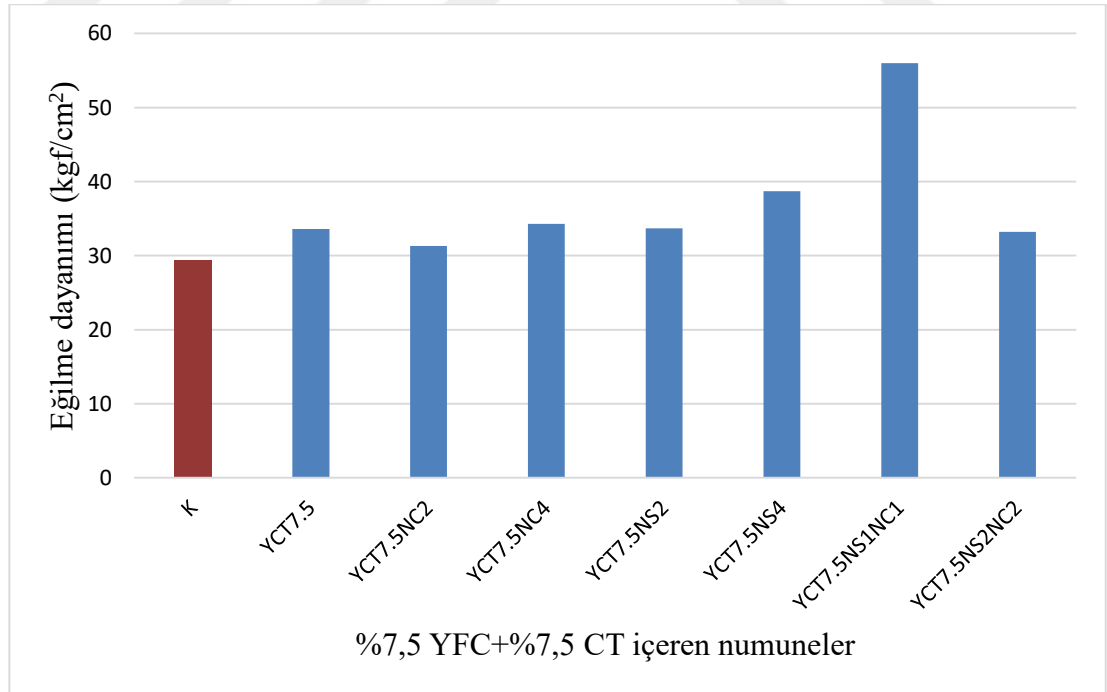
Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri arasında özellikle cam tozlu numunelerde olmak üzere yüksek değerlerde korelasyon elde edilememiştir. YFC'li numunelerde $R^2:0.60$ (orta değer) ve YFC+CT'li numunelerde ise $R^2:0.32$ olarak bulunmuştur. Bu durum bize alkali aktive edilen kompozitlerde alkali aktivatör türüne ve oranına bağlı olarak çimentolu kompozitlerde gördüğümüz basınç dayanımı-eğilme dayanımı yüksek korelasyonunun oluşmadığını göstermektedir.

Çizelge 4.4. 60 günlük eğilme dayanımı sonuçları

Gruplar	Ortalama Eğilme Dayanımı kgf/cm ²	Kontrol betonuna göre artış-azalış oranı %
K	29,3	-
Y15	45,75	56,2
Y15NC2	35,7	21,2
Y15NC4	34,1	16,4
Y15NS2	38,2	30,4
Y15NS4	33,6	14,7
Y15NS1NC1	47,2	61,1
Y15NS2NC2	39,9	36,2
YCT7.5	33,6	14,7
YCT7.5NC2	31,3	6,8
YCT7.5NC4	34,3	17,1
YCT7.5NS2	33,7	15,0
YCT7.5NS4	38,7	32,1
YCT7.5NS1NC1	56,0	91,2
YCT7.5NS2NC2	33,2	13,3

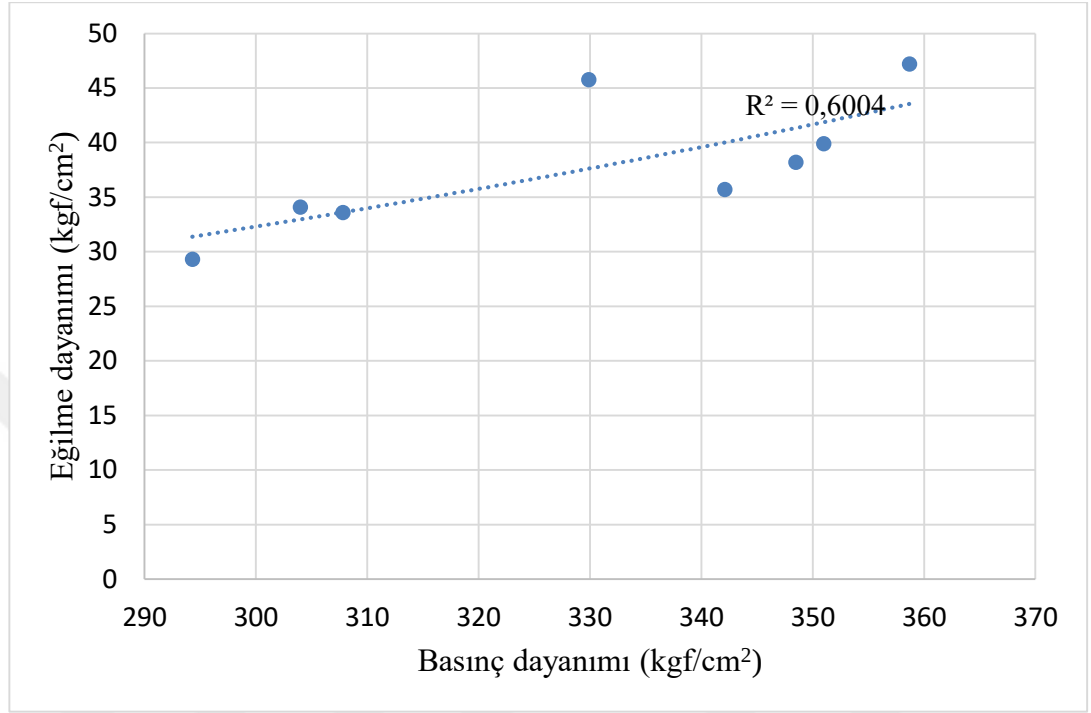


Şekil 4.5. 60 günlük eğilme dayanımı sonuçları (%15YFC)

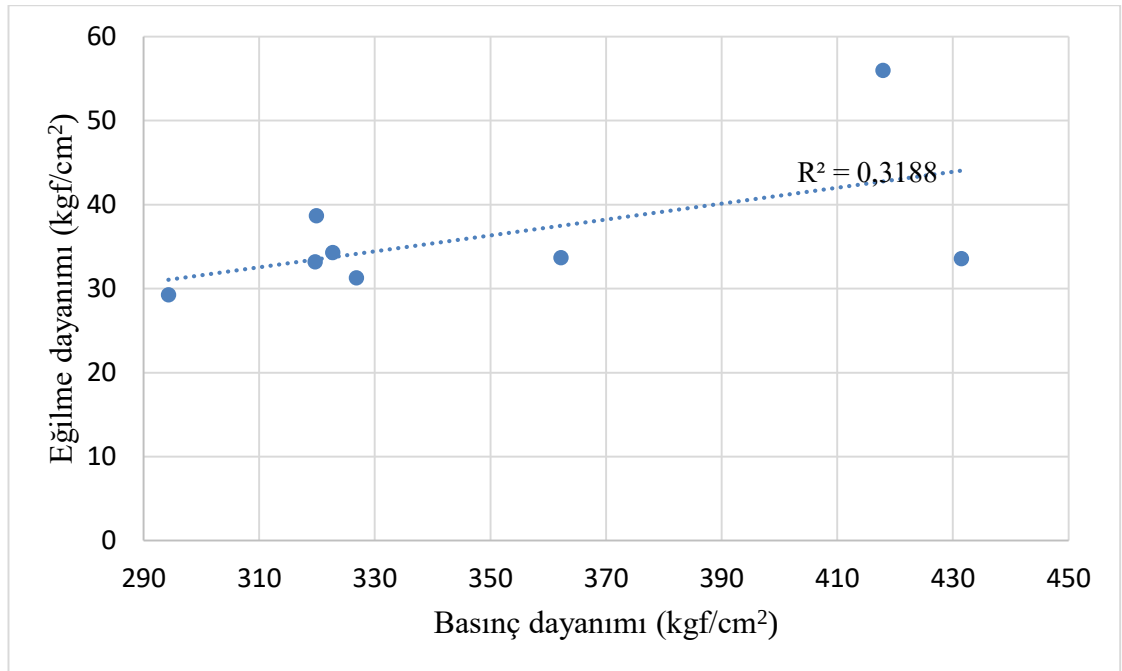


Şekil 4.6. 60 günlük eğilme dayanımı sonuçları (%7,5YFC+%7,5CT)

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de eğilme ve basınç dayanımı arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 4.7. Eğilme ve basınç dayanımı ilişkisi (%15YFC)



Şekil 4.8. Eğilme ve basınç dayanımı ilişkisi (%7,5YFC+%7,5CT)

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

YFC'nin ve atık malzeme olan cam tozu ile YFC'nin alkalilerle aktive edilerek kullanıldığı bu çalışmada üretilen betonların özelliklerine aktivatör türü ve oranı etkisi araştırılmış, çıkan sonuçlar ve tavsiyeler aşağıda verilmiştir:

Üretilen numunelerin birim ağırlıkları açısından en düşük birim ağırlık Y15 grubunda en yüksek sonuç ise Y15NS4, YCT7.5NS1NC1 gruplarında elde edilmiştir. Çimento yerine kullanılan YFC, cam tozu ve alkali aktivatörlerin birim ağırlıkları çimentoya göre düşük olduğundan karışımlarda birim ağırlık değerlerini düşürmesi beklenirken bu durum gerçekleşmemiştir. Çimento yerine eklenen malzemelerin kullanılma oranlarının düşük olması ve alkali aktivatör içeren karışımlarda oluşan ürünlerin birim ağırlığını artırıcı yönde değiştirdiğini ve oluşan yeni bağlar ve ürünlerin enstrümental analiz teknikleri ile irdelenerek birim ağırlık üzerine etkilerinin daha net ortaya konulması gerektiğini göstermektedir.

Çökme deneyinden elde edilen sonuçlara göre en düşük çökme miktarı Y15 grubunda en yüksek sonuç ise YCT7.5NS2 grubunda elde edilmiştir. Kıvam değerleri S3 ve S4 sınıflarına girmektedir. Çimento yerine sadece YFC nin kullanıldığı gruplarda çökme miktarının azaldığı ve aktivatörlerin YFC'li betonlarda işlenebilme özelliklerini geliştirdiği görülmüştür. Aktivatörlerden en çok NS'nin kullanıldığı gruplarda en yüksek çökme değeri görülmüş NS, NC'ye göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir.

YFC ve CT içeren gruplarda CT'nin işlenebilirlik üzerine olumlu etkisi olduğu belirlenmiş, NS, NC'ye göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca NC'nin kullanıldığı gruplarda oluşan ürünler ve karışımın pH değerinden kaynaklanan farklı bir yapışkanlık özelliği farkedilmiş olup bu parametrelerin analiz teknikleri ile saptanması tavsiye edilmektedir.

Tüm grupların 60 günlük basınç dayanımı sonuçları kontrol betonuna göre daha yüksek çıkmış en iyi dayanım değeri YCT7.5 kodlu grupta tespit edilmiştir. Bu sonuç cam tozlarının basınç dayanımında oldukça iyi bir etkisinin olduğunu göstermekte içeriğindeki SiO_2 'nin etkisiyle puzolanik özellik gösterdiği ve kompozitin boşluklarında doldurucu etki yaptığı düşünülmektedir.

Aktivatörlerin türünden bağımsız olarak özellikle YFC ağırlığının %2'si oranında Na^+ konsantrasyonu içeren alkali aktive numunelerde yüksek basınç dayanımı görüldüğü belirlenmiştir ve bu oran yapılacak diğer çalışmalar için tavsiye edilmektedir.

YFC'li ve CT'li gruplar sade YFC'lilere göre aktivatörlerin aynı tip ve oranları için tüm gruplarda daha yüksek dayanımlar göstermiştir. Buradan CT'nin alkali aktive edilmiş YFC'li kompozitlerde kullanımının olumlu sonuçlar doğuracağı görülmüştür. Bu sonucun CT'nin alkali aktive deneylerinde önemli parametre olan Si-O-Si polimer bağlarına katkı sağladığı şeklinde düşünülmektedir.

NS aktivatörlü numunelerin diğer aktivatöre göre basınç dayanımlarında daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. NS içeren numunelerde işlenebilirlik azalırken dayanımın artması kompozitlerde işlenebilme-dayanım özelliklerinin belirlenmesinde yeni işlenebilirlik ölçme yöntemlerine gerek duyulabileceği düşüncesini beraberinde getirmiştir. Ayrıca aktivatör tipi işlenebilme-dayanım özelliklerini belirlemede en temel parametrelerden biri görülmüştür.

Alkali aktive edilen çalışmalarda çimentolu gruplara nazaran taze halde daha farklı bir yapışkanlık özelliğinin görülmesi bu kompozit türlerinde özellikle arayüzey gelişimi ve taze hal özellikleri incelemelerinin önem arz ettiğini ortaya koymuştur. Çeşitli analizlerle saptanacak olan ürünler ve etkilerinin bu konuda yapılacak olan işlenebilirlik ve performans (dayanım ve durabilite) deneylerine önemli bir ışık tutması beklenmektedir.

Eğilme dayanımları açısından YCT7.5NS1NC1 kodlu grup en yüksek değerde olup karma aktivatör kullanımının kompozitlerin mekanik özelliklerini en iyi şekilde etkilediği belirlenmiştir.

Aktivatör açısından basınç dayanımında olduğu gibi NS'li numunelerin eğilme dayanımları NC'li numunelerden daha yüksek çıkmıştır.

Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri arasında yüksek değerde korelasyon elde edilememiş alkali aktive edilen kompozitlerde alkali aktivatör türüne ve oranına bağlı olarak basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasında yüksek korelasyon beklenmeyeceği görülmüştür.

Kullanılan aktivatörler göz önüne alındığında sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) ın beraber kullanıldığı gruplarda olumlu sonuçlar elde edilmiş bu bileşik etkinin daha detaylı olarak enstrümental analizlerle desteklenmesi (SEM, XRD, TGA, FTIR,...vb.) tavsiye edilmektedir.

Farklı oranlarda farklı aktivatörlerle farklı kür ortamlarında bu tarz çalışmaların yapılarak özellikle çimento miktarının daha fazla azaltılması tavsiye edilmektedir.

Sonraki çalışmalar için deneysel çalışmaların yapıldığı kompozitler üzerinde durabilite deneylerinin de yapılması (özellikle alkali-silika reaksiyonu) ve sonuçlarının iç yapı analizleri ile desteklenerek verilmesi önemlidir.

KAYNAKLAR

- Acevedo-Martinez, E., Gomez-Zamorano, L. Y., & Escalante-Garcia, J. I., 2012. Portland cement-blast furnace slag mortars activated using waterglass:–Part 1: Effect of slag replacement and alkali concentration. *Construction and Building Materials*, 37, 462-469.
- Ali, M. H., Dinkha, Y. Z., Haido, J. H., 2017. Mechanical properties and spalling at elevated temperature of high performance concrete made with reactive and waste inert powders. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(2), 536-541.
- Aliabdo, A. A., Elmoaty, A. E. M. A., Aboshama, A. Y., 2016. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 866-877.
- Aliabdo, A. A., Elmoaty, A. E. M. A., & Emam, M. A., 2019. Factors affecting the mechanical properties of alkali activated ground granulated blast furnace slag concrete. *Construction and Building Materials*, 197, 339-355.
- Altynova, A. E., Aidarova, N. A., Sarkenov B. B., 2015. Research and development of concrete technology using recycled glass waste, *Modern research and innovation*, (4-2), 20-26.
- Anonim, 1996a TS EN 933-2 Agregaların geometrik özellikleri için deneyler kısım 2: Tane boyutu dağılım tayini-Deney elekleri, elek göz açıklıklarını anma büyüklükleri, Ankara.
- Anonim 1996b, TS 1226 ISO 3310-2, Deney elekleri - Teknik özellikler ve deneyler - Kısım 2: Delikli metal levhalı deney elekleri, Ankara.
- Anonim, 2003 TS EN 1008 Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Ankara.
- Anonim 2010a, TS EN 12350-6, Beton - Taze beton deneyleri, Ankara.
- Anonim 2010b, TS EN 12350-2, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, Ankara.
- Anonim, 2012a TS EN 1097-1 Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (mikro-Deval), Ankara.
- Anonim 2012b, TS EN 12390-4 Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 4: Basınç dayanımı - Deney makinelerinin özellikleri, Ankara.
- Anonim 2012c, TS EN 12390-5, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, Ankara.
- Anonim 2014, TS EN 12390-1, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri, Ankara.
- Anonymous 1993, ASTM C 125,. Standart Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, *Annual Book of ASTM Standards*.
- Anonymous 1994, ASTM C 618, Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.
- Anonymous 2014, ČSN EN 206, 2014. Concrete–Specification, performance, production and conformity, UNMZ, Prague, Czech Republic

- Arslan, M., 2001. Beton: Dökümü, kalıpları, kusurları ve dayanıklılığı, Atlas.
- Atış, C. D., Bilim, C., Çelik, Ö., Karahan, O., 2009. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and building materials*, 23(1), 548-555.
- Aydın, S., 2010. Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Bakharev, T., Sanjayan, J.G. and Cheng, Y.B., 2002. Sulfate attack on alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, 211-216.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B., 2000. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1367-1374.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., Cheng, Y. B., 1999. Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29(1), 113-120.
- Bilim C., 2006. Yüksek fırın cürufu katkısının çimento tabanlı malzemelerde kullanılabilirliği.
- Bilim, C., Atış, C. D., 2012. Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 28(1), 708-712.
- Bingöl, Ş., 2018. Alkali ile Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi.
- Bisht, K., Ramana, P. V, 2018. Sustainable production of concrete containing discarded beverage glass as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 177, 116-124.
- Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., Ramezaniapour, A. A., 2011. Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 251-260.
- Buchanan, A. H., Abu, A. K., 2017. Structural design for fire safety. John Wiley & Sons.
- Bye, G. C., 1983. Portland Cement: Composition. Production and Properties, 19.
- Cervantes, V., Roesler, J., 2007. Ground granulated blast furnace slag. Technical Note, Center of Excellence for Airport Technology, 1-4.
- Chang, JJ., 2003. A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, Jul 1;33(7):1005-11.
- Chi, M., and Huang, R., 2013. Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construction and building materials*, 40, 291-298.
- Chi, M., 2012. Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 240-245.
- Chi, M., Huang, R., 2013. Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construction and building materials*, 40, 291-298.
- Collins, F., Sanjayan, J. G. 1999. Strength and shrinkage properties of alkali-activated slag concrete containing porous coarse aggregate. *Cement and Concrete Research*, 29(4), 607-610.
- Collins, F., Sanjayan, J. G., 2000. Numerical modeling of alkali-activated slag concrete beams subjected to restrained shrinkage. *Materials Journal*, 97(5), 594-602.

- Cota, F. P., Melo, C. C. D., Panzera, T. H., Araújo, A. G., Borges, P. H. R., Scarpa, F., 2015. Mechanical properties and ASR evaluation of concrete tiles with waste glass aggregate. *Sustainable Cities and Society*, 16, 49-56.
- Du, H., Tan, K. H., 2013. Use of waste glass as sand in mortar: Part II- alkali-silica reaction and mitigation methods. *Cem Concr Compos*, 35: 118-126.
- Du, H., Tan, K. H., 2017. Properties of high volume glass powder concrete. *Cement and Concrete Composites*, 75, 22-29.
- Dyer, T. D., Dhir, R. K., 2001. Chemical reactions of glass cullet used as cement component. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(6), 412-417.
- Elibol, C., 2012. Alkalilerle Aktive Edilen Çimento Esaslı Malzemelerin Basınç Dayanımlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Erdoğan T.Y., 2004. Beton Malzemeleri Sorular ve Yanıtlar, THBB Yayınları.
- Erdoğan T.Y., Erdem, T.K., Döven, A.G., 2000. Benefits of Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Concrete Admixture in Northern Cyprus, *Advances in Civil Engineering, Fourth International Congress*, 1-3, Turkish Republic of Northern Cyprus, Proceedings, Vol 4, pp.1637-1645.
- Erdoğan, T. Y., 2016. Beton, Altıncı Baskı, Odtü Yayıncılık, 760s, Ankara.
- Erdoğan, T. Y., Beton, O. D. T. Ü. 2003 . Geliştirme Vakfı Yay. ve İletişim AŞ.
- Erdogan, T.Y., 1997. Admixtures for concrete, Middle East Technical University, The Middle East Technical University Press, ISBN 975-429-113-6, 188 s. Ankara.
- Fernandez-Jimenez, A. ve Puertas, F. 2002. The alkali-silica reaction in alkaliactivated granulated slag mortars with reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 32 (7), 1019-1024.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., 2005. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and concrete research*, 35(10), 1984-1992.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J. G., Puertas, F., 1999. Alkali-activated slag mortars: mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1313-1321.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J. G., Puertas, F., 1999. Alkali-activated slag mortars: mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1313-1321.
- Fernandez-Jimenez, A., Puertas, F., 2002. The alkali-silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 32(7), 1019-1024.
- Granizo, M. L., Blanco-Varela, M. T., Martínez-Ramirez, S., 2007. Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2934-2943.
- Han, W., Sun, T., Li, X., Sun, M., Lu, Y., 2016. Using of borosilicate glass waste as a cement additive. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 381, 11-15.
- Huanhai, Z., Xuequan, W., Zhongzi, X., Mingshu, T., 1993. Kinetic study on hydration of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*, 23(6), 1253-1258.
- Islam, G. S., Rahman, M. H., Kazi, N., 2017. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 37-44.

- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Hamdan, S., van Deventer, J. S., 2014. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 45, 125-135.
- Jani, Y., Hogland, W., 2014. Waste glass in the production of cement and concrete—A review. *Journal of environmental chemical engineering*, 2(3), 1767-1775.
- Kathirvel, P., Kaliyaperumal, S. R. M., 2016. Influence of recycled concrete aggregates on the flexural properties of reinforced alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 102, 51-58.
- Kaya, M., 2016. Farklı Tür Uçucu Küller Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi.
- Khmiri, A., Samet, B., Chaabouni, M., 2012. A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement. *Construction and Building Materials*, 28(1), 680-686.
- Kılıçoğlu, C., (2013). Cam atıklarının betonda agrega ve çimento yerine kullanımı, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Kılıçoğlu, C., Çoruh, S., 2016. Atık Cam ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Hazırlanan Betonlarda Alkali-Silika Reaksiyonu.
- Kocabıyık, L., 2010. Yüksek Fırın Cürufu Mineral Katkısının Betondaki Etkinlik Katsayısının Belirlenmesi ve Betonun Kırılma Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Komljenovic, M., Bascarevic, Z., Bradic, V., 2010. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 35-42.
- Kushartomo, W., Bali, I., Sulaiman, B., 2015. Mechanical behavior of reactive powder concrete with glass powder substitute. *Procedia Engineering*, 125, 617-622.
- Kwon, YJ., 2005. A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect. *Cement and Concrete Research*, Jul 1;35(7):1305-13.
- Lee, H., Hanif, A., Usman, M., Sim, J., Oh, H., 2018. Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. *Journal of Cleaner Production*, 170, 683-693.
- Li, Y., & Sun, Y., 2000. Preliminary study on combined-alkali-slag paste materials. *Cement and concrete research*, 30(6), 963-966.
- Lu, J. X., Zhan, B. J., Duan, Z. H., Poon, C. S., 2017. Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates. *Materials and Design*, 135, 102-111.
- Matos, A., Sousa-Coutinho, J., 2012. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Constr Build Mater*, 36: 205-215.
- Meena, A., & Singh, R., 2012. Comparative study of waste glass powder as pozzolanic material in concrete.
- Mielenz, R. C., 1983. Mineral admixtures-History and background. *Concrete International*, 5(8), 34-42.
- Moon, J., Speziale, S., Meral, C., Kalkan, B., Clark, S. M., Monteiro, P. J., 2013. Determination of the elastic properties of amorphous materials: case study of alkali-silica reaction gel. *Cement and Concrete Research*, 54, 55-60.

- Nikolic, I., Karanovic, L., Castvan, I. J., Radmilovic, V., Mentus, S., & Radmilovic, V., 2014. Improved compressive strength of alkali activated slag upon heating. *Materials Letters*, 133, 251-254.
- Nwaubani, S. O., Poutos, K. I., 2013. The influence of waste glass powder fineness on the properties of cement mortars. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, 2(2), 110-116.
- Omran, A., Tagnit-Hamou, A., 2016. Performance of glass-powder concrete in field applications. *Construction and Building Materials*, 109, 84-95.
- Orhan, E., Şahin, M., (2016) Öğütülmüş Atık Cam Tozu Katkılı Betonun Basınç Dayanımına Yüksek Sıcaklığın Etkisi, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(1).
- Özodabaş, A., 2014. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu Harçların Performansının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi.
- Ozturk, M., Bankir, M. B., Bolukbasi, O. S., & Sevim, U. K., 2019. Alkali activation of electric arc furnace slag: Mechanical properties and micro analyzes. *Journal of Building Engineering*, 21, 97-105.
- Pachecho-Torgal, F., J. Castro-Gomes, S., Jalal *İ*, 2008. Alkaliactivated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, 22(7): p. 1315-1322.
- Pachecho-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S., 2008. Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1305-1314.
- Park, S. B., Lee, B. C., Kim, J. H., 2004. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and concrete research*, 34(12), 2181-2189.
- Payá, J., Agrela, F., Rosales, J., Morales, M. M., & Borrachero, M. V., 2019. Application of alkali-activated industrial waste. In *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete* (pp. 357-424). Woodhead Publishing.
- Petermann, J. C., Saeed, A., Hammond, M. I., 2010. Final technical report on alkali-activated geopolymers: A literature review. Air force research laboratory Materials and manufacturing directorate.
- Puertas, F., Amat, T., Fernández-Jiménez, A., Vázquez, T. 2003. Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research*, 33(12), 2031-2036.
- Rakhimova, N. R., Rakhimov, R. Z., 2015. Alkali-activated cements and mortars based on blast furnace slag and red clay brick waste. *Materials & Design*, 85, 324-331.
- Ramachandran, V. S., 1995. *Concrete Admixtures Handbook 2nd Edition*. Properties. Science and Technolog., Park Ridge, USA.
- Rashad, A. M., Sadek, D. M., Hassan, H. A., 2016. An investigation on blast-furnace slag as fine aggregate in alkali-activated slag mortars subjected to elevated temperatures. *Journal of cleaner production*, 112, 1086-1096.
- Rodier, L., Savastano Jr, H., 2018. Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials. *Journal of cleaner production*, 184, 333-341.
- Rovnanik, P., Reznik, B., Rovnanikova, P., 2016. Blended alkali-activated fly ash/brick powder materials. *Procedia Engineering*, 151, 108-113.

- Roy, D. M., 1982. Hydration, structure, and properties of blast furnace slag cements, mortars, and concrete. In *Journal Proceedings* (Vol. 79, No. 6, pp. 444-457).
- Roy, D.M., 1999. Alkali-activated cements, Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 29(2): p. 249-254.
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., Chung, Y. S., 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 47, 409-418.
- Saribiyik, M., Piskin, A., Saribiyik, A., 2013. The effects of waste glass powder usage on polymer concrete properties. *Construction and building materials*, 47, 840-844.
- Schwarz, N., DuBois, M., Neithalath N., 2007. Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes. *Cem Concr Compos*, 29: 656-666.
- Shayan, A., 2002. Value-added utilisation of waste glass in concrete. In *IABSE Symposium Report* (Vol. 86, No. 6, pp. 12-21). International Association for Bridge and Structural Engineering.
- Shi, C., Roy, D., Krivenko, P., 2003. *Alkali-activated cements and concretes*, CRC press.
- Shi, C., Zheng, K., 2007. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 234-247.
- Silva, S. V. A., Kithalawa Arachchi, J. N. J., Wijewardena, C. L., Nanayakkara, S. M. A., 2012. Development of fly ash based geopolymer concrete.
- Soliman, N. A., Tagnit-Hamou, A., 2016. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder–Towards ecofriendly concrete. *Construction and building materials*, 125, 600-612.
- Tokyay, M., Ayturan, P., 2010. Mineral katkıların alkali ile aktive edilmesi: Bölüm 2, *Çimento ve Beton Dünyası*, 15-89, 77-91.
- Tokyay, M., Erdoğan, K., 2003. *Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi Raporu*. TÇMB Yayını, Ankara, 48.
- Topcu, I. B., Canbaz, M., 2004. Properties of concrete containing waste glass. *Cement and concrete research*, 34(2), 267-274.
- Topçu, İ. B., Canbaz, M., 2008. Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu Harçlarda Donma Çözümü. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2), 1-16.
- Topçu, İ. B., Canbaz, M., 2008. Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu Harçlarda Donma Çözümü. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2), 1-16.
- Ulu, C., 2016. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu ve Metakaolinli Harçlarda Atık Pet Agrega Kullanımının Araştırılması, *Y.Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ömer Halisdemir Üniversitesi.
- Vaitkevicius, V., Serelis, E., Hilbig, H., 2014. The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 68, 102-109.
- Vijayakumar, G., Vishaliny, H., Govindarajulu, D., 2013. Studies on glass powder as partial replacement of cement in concrete production. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(2), 153-157.

- Virgalitte, S. J., Luther, M. D., Rose, J. H., Mather, B., Bell, L. W., Ehmke, B. A., Lewis, D. W., 1995. Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete. American Concrete Institute ACI Report 233R-95.
- Wang, H. Y., Huang, W. L., 2010. Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass. *Construction and Building Materials*, 24(6), 1008-1013.
- Xiao, J., Lu, D., Ying, J., 2013. Durability of recycled aggregate concrete: An overview. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 11(12), 347-359.
- Yang, K. H., Cho, A. R., Song, J. K., Nam, S. H. 2012. Hydration products and strength development of calcium hydroxide-based alkali-activated slag mortars. *Construction and Building Materials*, 29, 410-419.
- Yakupoğlu, A., 2010. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu Harçların Özellikleri, Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi.
- Yuksel, C., Ahari, R. S., Ahari, B. A., Ramyar, K., 2013. Evaluation of three test methods for determining the alkali-silica reactivity of glass aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 38, 57-64.
- Zhang, Z. H., Zhu, H. J., Zhou, C. H., & Wang, H. (2016). Geopolymer from kaolin in China: an overview. *Applied Clay Science*, 119, 31-41.
- Zhu, H., Zhang, Z., Zhu, Y., Tian, L., 2014. Durability of alkali-activated fly ash concrete: chloride penetration in pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 65, 51-59.
- Zidol, A., Tognonvi, M. T., Tagnit-Hamou, A., 2017. Effect of glass powder on concrete sustainability, *New Journal of Glass and Ceramics*, 7(02), 34.
- Zivica, V., 2006. Effectiveness of new silica fume alkali activator. *Cement and Concrete Composites*, 28(1), 21-25.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Şirvan (AZERBAYCAN) şehrinde doğdu. Şirvan’da ortaokul ve lise okuduktan sonra 2007-2011 yılları arası Azerbaycan Mimarlık ve İnşaat Üniversitesinde İnşaat Mühendisliği bölümünü okudu ve 2016 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans eğitimine başladı. Evlidir ve iki çocuk babasıdır.

