C. ULU, 2016

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

T.C.
ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFLU VE METAKAOLİNLİ HARÇLARDA ATIK PET AGREGA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

CÜNEYT ULU

Eylül 2016

T.C.
ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFLU VE METAKAOLİNLİ HARÇLARDA ATIK PET AGREGA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

CÜNEYT ULU

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Semiha AKÇAÖZOĞLU

Eylül 2016

Cüneyt ULU tarafından **Doç.Dr. Semiha AKÇAÖZOĞLU** danışmanlığında hazırlanan "**Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cüruflu ve Metakaolinli Harçlarda Atık PET Agrega Kullanımının Araştırılması**" adlı bu çalışma jürimiz tarafından Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç.Dr. Semiha AKÇAÖZOĞLU, Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç.Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç.Dr. Cahit BİLİM, Mersin Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ..../..../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun ..../..../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR V.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Cüneyt ULU

ÖZET

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ
YÜKSEK FIRIN CÜRUFLU VE METAKAOLİNLİ HARÇLARDA ATIK PET
AGREGA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

ULU, Cüneyt
Ömer Halisdemir Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Semiha AKÇAÖZOĞLU

Eylül 2016, 79 sayfa

Bu çalışmada, alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu (AA-YFC) harçlar ile yüksek fırın cürufu-metakaolin (AA-YFC-MK) karışımlı harçlarda atık PET şişe kırıklarının agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sıvı sodyum silikat (Na_2SiO_3) karışımı kullanılmıştır. Atık PET agrega, öğütülmemiş cüruf agrega ile hacimce %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı, su emme ve boşluk oranları deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklıklara tabi tutulan öğütülmemiş cüruf agregalı AA-YFC'li numunelerin yüksek sıcaklık dayanımları incelenmiştir. PET agrega oranı %60 ve %80 olan AA-YFC'li numunelerin birim ağırlık ve basınç dayanım değerleri taşıyıcı hafif beton sınırları içinde çıkmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz kalan AA-YFC numunelerinin basınç dayanım değerlerinin 800°C sıcaklığa kadar azaldığı, ancak 1000°C'de dayanımlarının tekrar arttığı görülmüştür. Deneyler sonucunda elde edilen bulgular, atık PET şişe kırıklarının AA-YFC'li harçlarda agrega olarak kullanılabilme potansiyelinin olduğunu göstermiştir.

Anahtar sözcükler: Geri dönüşüm, atık PET, alkali aktivatör, hafif beton, yüksek fırın cürufu, metakaolin, sodyum silikat, sodyum hidroksit.

SUMMARY

INVESTIGATION ON THE USE OF
WASTE PET AGGREGATES IN ALKALI-ACTIVATED
BLAST FURNACE SLAG-METAKAOLIN BLENDED MORTARS

ULU, Cüneyt
Ömer Halisdemir University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor : Associate Professor Dr. Semiha AKÇAÖZOĞLU

September 2016, 79 pages

In this study the utilization of shredded waste Poly-ethylene Terephthalate (PET) bottle granules as aggregate in alkali-activated slag and slag/metakaolin blended mortar was investigated. Sodium hydroxide (NaOH) pellets and liquid sodium silicate (Na_2SiO_3) were used as activators. Waste PET aggregate replaced with unground slag aggregate in amount of 20%, 40%, 60%, 80% and 100% by volume. The unit weight, compressive strength, flexural tensile strength, ultrasonic wave velocity and water absorption and porosity ratios of the produced mixtures were measured. In addition alkali-activated sag mixtures including unground slag aggregate were exposed to elevated temperatures of 200, 400, 600, 800 and 1000°C and their properties after exposed to high temperatures were investigated. Alkali-activated slag mixtures containing 60% and 80% waste PET aggregate were drop into structural lightweight concrete category in terms of unit weight and strength properties. The residual compressive strength of slag aggregate specimens decreased up to 800°C, but increased again after 1000°C. It is concluded from the test results that, there is a potential for the use of waste PET as aggregate in the production of alkali-activated slag mortar.

Keywords: Recycling, waste PET, alkali activator, lightweight concrete, blast furnace slag, metakaolin, sodium silicate, sodium hydroxide.

ÖN SÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince, her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Semiha AKÇAÖZOĞLU'na içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında desteklerinden ötürü Sayın Doç.Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU'na, Doç.Dr. Fatih ÖZCAN'a, Doç.Dr. Metin Hakan SEVERCAN'a teşekkür ederim.

Bu çalışmaya FEB2012/31 numaralı proje ile finansal destek sağlayan Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Her zaman ve her konuda yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, eşime ve canım oğlum Mehmet Miraç'ıma şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET……... iv
SUMMARY……...……v
ÖN SÖZ…….……..……...…..vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ……..…….....vii
ÇİZELGELER DİZİNİ…….....….....x
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ xii
BÖLÜM I GİRİŞ 1
BÖLÜM II KAYNAK ARAŞTIRMASI…….…….5
2.1 Alkalilerle Aktive Edilen Yüksek Fırın Cüruflu ve Metakaolinli Betonlar....……5
2.1.1 Yüksek fırın cürufu……5
2.1.2 Yüksek fırın cürufunun üretimi ...……..6
2.1.3 Alkalilerle aktive edilen yüksek fırın cüruflu (AA-YFC) betonlar ...……9
2.1.4 AAYFC bağlayıcılı betonların avantajları ……...9
2.1.5 AA-YFC bağlayıcılı betonların dezavantajları……10
2.1.6 AA-YFC bağlayıcılı betonların tarihsel gelişimi……10
2.1.7 AA-YFC bağlayıcılı betonlar konusunda yapılmış çalışmalar……12
2.1.8 Metakoalin ……...15
2.1.8.1 Metakaolinin çimento ve beton üretiminde kullanımı ……...16
2.1.8.2 Metakaolinin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi……16
2.2 Atık PET Agregalı Betonlar …….……17
2.2.1 Plastik atık çeşitleri ile ilgili genel bilgiler……..17
2.2.2 Polietilen tereftalat (PET) ……..18
2.2.3 Atık PET agregalı betonlar konusunda yapılmış çalışmalar ...……18
2.3 BetonunYangın Dayanımı……..……..…. 20
2.3.1 Yangın……...……..… 20
2.3.2 Yüksek sıcaklığın betona etkileri……...……. 20
2.3.2.1 Çimento hamuru……..21
2.3.2.2 Agrega……22
2.3.2.3 Mineral katkı malzemeleri…….. 24

2.3.3 Yüksek sıcaklığın betonun fiziksel özelliklerine etkileri……24
2.3.3.1 Isı iletim katsayısı……... 25
2.3.3.2 Isıl genleşme katsayısı…….……26
2.3.3.3 Özgül ısı 26
2.3.3.4 Birim hacim ağırlık ..... .26
2.3.3.5 Yüksek sıcaklığın betonun rengine etkileri 27
2.3.4 AA-YFC bağlayıcılı betonların yangın dayanımı..... 27
BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMALAR 29
3.1 Kullanılan Malzemeler 29
3.1.1 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC)… 29
3.1.2 Metakaolin (MK) 29
3.1.3 Alkali aktivatör 30
3.1.4 Öğütülmemiş cüruf agrega 31
3.1.5 Atık PET agrega 32
3.1.6 Karışım ve bakım suyu 33
3.2 Karışım Oranları ve Numunelerin Üretimi 33
3.3 Numuneler Üzerinde Yürütülen Çalışmalar 36
3.3.1 Birim ağırlık..... 36
3.3.2 Eğilmede çekme dayanımı..... 36
3.3.3 Basınç dayanımı..... 38
3.3.4 Ultrases geçiş hızı 39
3.3.5 Su emme ve boşluk oranı..... 40
3.4 Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalan Numuneler ÜzerindeYürütülen Çalışmalar 41
3.4.1 Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı 43
3.4.2 Yüksek sıcaklık sonrası eğilmede çekme dayanımı 43
3.4.3 Yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı değerleri..... 43
3.4.4 Yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı 44
3.4.5 Yüksek sıcaklık sonrası su emme ve boşluk oranları ..... .44
BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA ..... .45
4.1 Atık PET Agregalı Alkali Aktive Edilmiş Harç Numuneler ile İlgili Deney Sonuçları……....45
4.1.1 Birim ağırlık…….……... 45
4.1.2 Basınç dayanımı…….…. 46
4.1.3 Eğilmede çekme dayanımı…….…..50

4.1.4 Basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı ilişkisi…….….. 50
4.1.5 Ultrases geçiş hızı…….…... 51
4.1.6 Basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi…….…52
4.1.7 Su emme ve boşluk oranları…… 53
4.2 Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalan Alkali Aktive Edilmiş Harç Numuneler ile İlgili Deney Sonuçları……55
4.2.1 Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı ……55
4.2.2 Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı ……...61
4.2.3 Yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı değerleri…….…..61
4.2.4 Yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı…….….62
4.2.5 Yüksek sıcaklık sonrası su emme ve boşluk oranları…….….63
BÖLÜM V SONUÇLAR……..... 64
KAYNAKLAR…… 66
ÖZ GEÇMİŞ……...….78
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER…….……..... 79

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. YFC ve MK'nin kimyasal oksit bileşimi…….30
Çizelge 3.2. Sodyum hidroksitin kimyasal kompozisyonu (%)…….. 30
Çizelge 3.3. Öğütülmemiş cüruf agreganın eleklerden geçen miktarları…… 32
Çizelge 3.4. Atık PET agreganın eleklerden geçen miktarları…… 33
Çizelge 3.5. Karışımların içerikleri……. 36
Çizelge 4.1. Numunelerin birim ağırlık değerleri……... 46
Çizelge 4.2. Numunelerin basınç dayanım değerleri…….. 47
Çizelge 4.3. Numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerleri……..50
Çizelge 4.4. Numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri……... 52
Çizelge 4.5. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları……...56
Çizelge 4.6. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları…….....61
Çizelge 4.7. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı değerleri……. 62
Çizelge 4.8. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kayıpları……... 62
Çizelge 4.9. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası su emme ve boşluk oranları…… 63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yüksek fırın cürufunun üretim şeması……..... 6
Şekil 2.2. Granülasyon yönteminin şematik gösterimi……..7
Şekil 2.3. Peletleme yönteminin şematik gösterimi…….. 8
Şekil 2.4. AA-YFC betonu ile inşa edilmiş bina……. 11
Şekil 2.5. AA-YFC ve PÇ betonu ile üretilmiş yollar……. 12
Şekil 3.1. Eğilme deneyi…….…….37
Şekil 3.2. Basınç deneyi…….. 39
Şekil 3.3. Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi…….…..40
Şekil 4.1. Numunelerin basınç dayanımları ile eğilmede çekme dayanımları arasındaki ilişki…….….……..51
Şekil 4.2. Numunelerin basınç dayanım değerleri ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki……... 52
Şekil 4.3. Numunelerin su emme oranları……... 53
Şekil 4.4. Numunelerin boşluk oranları…….……..54
Şekil 4.5. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları…….…..…59

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. Öğütülmüş YFC……29
Fotoğraf 3.2. Sodyum hidroksit (NaOH)……30
Fotoğraf 3.3. Sodyum silikat (Na_2SiO_3)…….. 31
Fotoğraf 3.4. Öğütülmemiş cüruf agrega…… 32
Fotoğraf 3.5. Atık PET agrega…… 33
Fotoğraf 3.6. Harç karışımların hazırlanması……...……... 34
Fotoğraf 3.7. Kalıba yerleştirilmiş harç karışımı……35
Fotoğraf 3.8. Kür kabinine yerleştirilmiş numuneler…….. 35
Fotoğraf 3.9. Eğilmede çekme testi……37
Fotoğraf 3.10. Basınç dayanımı testi……... 38
Fotoğraf 3.11. Ultrases geçiş hızının ölçülmesi…….. 40
Fotoğraf 3.12. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler……... 42
Fotoğraf 3.13. Yavaş soğutulan numuneler (havada)……. 42
Fotoğraf 3.14. Hızlı soğutulan numuneler (suda)……43
Fotoğraf 4.1. Numunelerin yüksek sıcaklık öncesindeki görünüşleri……. 55
Fotoğraf 4.2. Numunelerin fırından çıkarılması……..56
Fotoğraf 4.3. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin görünüşleri…….…… 58
Fotoğraf 4.4. 800°C sıcaklığa maruz kalan numunelerin soğutulduktan sonraki görünüşleri……...……...58
Fotoğraf 4.5. PÇ'li numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görünüşleri…….……... 59
Fotoğraf 4.6. 1000 °C sıcaklıkta numunelerin görünüşü……60
Fotoğraf 4.7. 1000°C sıcaklığa maruz kalan numunenin soğutulduktan sonraki görünüşü…….……..……. 60

BÖLÜM I
GİRİŞ

Alkalilerle aktive edilen bağlayıcılar çimento ile karşılaştırıldığında, çevre ve enerji korunumu, yüksek dayanım ve dayanıklılık gibi özellikleri nedeniyle; yapı endüstrisi alanında araştırmacıların üzerinde durduğu konulardan biri haline gelmiştir. Alkalilerle aktive edilen bağlayıcı maddeler, kireç ve Portland çimentosundan sonra üçüncü nesil bağlayıcı olarak sınıflandırılmaktadır. Alkaliler ile aktive edilen yüksek fırın cürufu (YFC), uçucu kül ve metakaolin (MK) gibi bu tür klinker içermeyen bağlayıcılar Portland çimentosuna alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Bernal vd., 2012; Altan ve Erdoğan, 2012; Aydın ve Baradan, 2013; Puertas vd., 2003; Shi vd., 2006; Lif vd., 2010). Alkali aktive edilen bağlayıcılar erken yaşlarda yüksek dayanım sergilemeleri, agresif ortamlara karşı dayanıklılık, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük enerji tüketimi ve Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında düşük CO_2 salınımı gibi özelliklere sahiptir (Puertas vd., 2003; Bernal vd., 2011a; Chi, 2012). Bu avantajları nedeniyle, alkali aktive edilen bağlayıcılar başta inşaat sektörü olmak üzere çeşitli alanlarda giderek artan şekilde kullanılmaktadır.

Alkali ile aktive edilen bağlayıcıların performanslarını etkileyen unsurların başında bağlayıcı malzemelerin türü ve aktivasyon koşulları gelmektedir. Alkali ile aktive edilen bağlayıcı malzemeler YFC, MK ya da uçucu kül gibi endüstriyel atıklardır (Murri vd., 2013). Alkali aktive edilmiş YFC, “Si+Ca” sisteminin bir modelidir ve ana reaksiyon ürünü kalsiyum silikat hidrat (C-S-H)’tır. Ana malzemesi MK veya uçucu kül olan alkali aktive edilmiş bağlayıcılar ise “Si+Al” sisteminin bir türüdür, reaksiyon ürünleri polimerlere benzeyen zeolitlerdir (Pacheco-Torgal, vd., 2008). İkinci grup bağlayıcılar polimerik yapısı sebebiyle jeopolimer olarak adlandırılır (Li vd., 2010; Davidovits, 1994).

YFC çok az veya hiç bağlayıcı özellik göstermemesine rağmen, alkali aktive edilmiş cüruf (AA-YFC) betonu uygun bir alkali aktivatör kullanılması durumunda çok yüksek mukavemet gösterebilir (Krizan ve Zivanovic, 2002). AA-YFC betonları dayanım ve agresif ortamlara karşı dayanıklılık açılarından Portland çimentolu (PÇ) betonlara yakın veya daha iyi özellikler sergileyebilir. Ayrıca AA-YFC betonunun yüksek sıcaklık dayanımı PÇ’li betonlardan daha üstündür (Murri vd., 2013; Guerrieri ve Sanjayan,

2010; Bakharev vd., 1999a; Escalante-Garcia vd., 2009). AA-YFC betonunda bağlayıcı hamuru ile agrega veya donatı arasındaki bağ PÇ'lu betona göre daha iyidir (Puertas vd., 2003). Ancak, AA-YFC betonlarının priz süreleri PÇ'li betonlara göre daha hızlıdır ve daha yüksek büzülme gösterirler (Atiş vd., 2009; Bilim vd., 2013; Bakharev vd., 1999b; Jimenez vd., 1999).

AA-YFC betonlarının özelliklerini etkileyen faktörlerin başında; kullanılan cürufun yapısı ve inceliği, aktivatör tipi ve dozajı, aktivatörlerin karışıma eklenme zamanı, kimyasal ve mineral katkılar, su/çimento oranı, kür koşulları ve agrega miktarı gelmektedir (Shi vd., 2006 ;Chi, 2012; Yang vd., 2012; Collins ve Sanjayan, 1999a; Jimenez ve Palomo, 2005). Kullanılan alkali aktivatörün yapısı ise en önemli faktördür (Jimenez vd., 1999). Aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sıvı sodyum silikat (Na_2SiO_3) karışımı kullanıldığında oluşan ürün amorf ve çimentosal özellik gösterir. Ancak NaOH'in tek başına aktivatör olarak kullanıldığı karışımlarda oluşan ürününün yapısı ve kompozisyonu farklıdır (Li vd., 2010). Basınç dayanım değerleri dikkate alındığında; sodyum silikatın, sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sodyum hidroksite göre en iyi aktivasyonu sağladığı görülmektedir. Bu üç alkali aktivatörün aktivasyon etkisi $Na_2SiO_3.nH_2O$ + NaOH >> Na_2CO_3> NaOH şeklindedir (Bakharev vd., 1999b; Jimenez vd., 1999).

AA-YFC'li bağlayıcılar ile PÇ'li bağlayıcıların hidrasyon süreçleri birbirine benzemektedir, ancak hidrasyon mekanizmalarında farklılıklar bulunmaktadır. AA-YFC sisteminin ana reaksiyon ürünü PÇ'li sistemlere benzeyen C-S-H jelidir ancak Ca/Si oranı daha düşüktür (Puertas vd., 2003; Shi vd., 2006; Chi, 2012; Pacheco-Torgal vd., 2008; Sajedi ve Razak, 2012). AA-YFC sistemlerinin hidratasyon işlemi Na_2O içeriği ve silika modülünden ($M_S=SiO_2/Na_2O$) etkilenir. Yüksek silika modülüne sahip olan ve yüksek dozajda Na_2O içeren bir aktivatör kullanıldığında daha yüksek basınç dayanımı elde edilebilir (Altan ve Erdoğan, 2012; Chi, 2012; Al-Otaibi, 2008).

AA-YFC sistemlerinin dayanımı kür koşullarından da etkilenmektedir. Bu sistemlerin reaksiyonlarının aktivasyon enerjisi PÇ'li sistemlere göre daha yüksek olduğundan dolayı, yüksek sıcaklıkta kür edilen AA-YFC bağlayıcılı betonlar daha yüksek dayanımlar sergilemektedir (Jimenez ve Puertas, 1997; Esmaily ve Nuranian, 2012).

PÇ üretimi için oldukça fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır ve CO, CO_2 gibi zehirli gazlar atmosfere salınmaktadır. Bunların yanı sıra PÇ, beton üretimindeki en pahalı bileşendir. Bu sebeple beton üretiminde YFC gibi endüstriyel atıkların çimentoyla kısmen yer değiştirilmesi suretiyle çimento miktarını azaltma yoluna gidilmektedir. Demir çelik fabrikalarının atığı olan YFC'nin beton üretiminde kullanılması doğal kaynak tüketiminin azaltılması ve enerji tasarrufu sağlamanın yanı sıra beton dayanımının artmasına da katkı sağlamaktadır. Çimento ve beton sektöründe büyük oranlarda YFC kullanılmasına rağmen, ülkemizde endüstriyel atık olarak ortaya çıkan ve kullanılmayı bekleyen büyük miktarlarda YFC bulunmaktadır (Bilim vd., 2013). YFC'nin mevcut kullanım alanları bütün stokları tüketmek için yeterli olmamaktadır. Ayrıca YFC'yi bağlayıcı olarak kullanmak için öğütme işlemi gerekmektedir. Bu işlem için de enerji gerekli olduğundan, YFC'nin sadece bağlayıcı olarak değil, agrega olarak da kullanılması hem atık stoklarını tüketmek hem de enerji gereksinimini azaltmak açılarından yararlı olacaktır (Yüksel vd., 2007). Aynı zamanda, beton üretiminde agrega olarak kullanılan cürufun, betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmeye katkıda bulunduğu literatürde belirtilmektedir (Gesoğlu vd., 2012; Binici vd., 2012; Aguilar vd., 2010; Erdoğan, 2003).

Beton üretiminde agrega olarak kullanılan diğer bir atık malzeme ise atık plastik kırıklarıdır. Ülkemizde ve dünyada kullanım alanları giderek çoğalan plastik miktarına bağlı olarak, atık plastik miktarı da hızla artmaktadır. Bu durum çevre kirliliğinin yanı sıra katı atık depolama sorununun ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Plastik atıklar arasında en fazla yeri polietilen tereftalat (PET) şişelerin tuttuğu görülmektedir. Atık sorununa bir çözüm bulmak amacıyla, son yıllarda atık PET şişelerin geri dönüşümü konusunda bazı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar arasında, atık PET şişe kırıklarının çimento bağlayıcılı beton ve harçlarda agraga olarak kullanılması diğer geri dönüşüm yöntemlerine göre daha kolay ve ekonomik bir geri dönüşüm yöntemi olarak değerlendirilmektedir. Atık PET agregalı beton ve harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelendiği çeşitli araştırmalar mevcuttur. (Akçaözoğlu vd., 2013; Akçaözoğlu ve Atiş, 2011; Akçaözoğlu vd., 2010; Frigione, 2010, Gavela vd., 2004; Choi vd., 2005; Choi vd., 2009; Albano vd., 2009). Ancak literatürde atık PET agreganın alkali aktive edilmiş bağlayıcılarla birlikte kullanıldığı bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, alkali aktive edilmiş YFC bağlayıcılı ve YFC-MK bağlayıcılı harçlarda atık PET şişe kırıklarının agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmaktır. Beton üretiminde agrega olarak atık PET kırıklarının kullanımıyla, hem doğal agregadan tasarruf edilmiş olacak hem de PET atıkların ekonomik bir şekilde geri dönüşümü sağlanmış olacaktır. Atık PET agrega içeren alkali-aktive edilmiş harç numunelerin geri dönüşümlü yapı malzemeleri alanında yeni bir alternatif olması hedeflenmektedir.

İnşaat endüstrisi katı atıkların büyük miktarlarda kullanılarak geri dönüşümlerinin sağlanabileceği alanlardan birisidir. Atıkların geri dönüşümlü yapı malzemesi olarak kullanımı ile doğal kaynakların korunması, enerji tasarrufu, atık depolama alanlarının azaltılması ve çevre kirliliğinin önlenmesine katkıda bulunulmuş olacaktır. Ayrıca alkali aktive edilmiş beton üretiminde PÇ yerine bağlayıcı olarak tamamen YFC gibi endüstriyel atıkların kullanılmasıyla, PÇ üretimi sebebiyle ortaya çıkan sera gazı emisyonunun azaltılması da mümkün olacaktır.

BÖLÜM II
KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu çalışma, alkali aktive edilmiş harç ve betonlarda atık PET agrega kullanımı konusundaki ilk çalışma olduğundan dolayı, bu konuda daha önce yapılmış bir literatür bulunmamaktadır. Bu sebeple, kaynak araştırması, çalışmanın kapsamına bağlı olarak üç bölümde ele alınmıştır.

Birinci bölümde alkalilerle aktive edilmiş YFC'li ve MK'li betonlar hakkında genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde PET atıklar ve betonda kullanım alanları konusunda bilgilere yer verilmiştir. Üçüncü bölümde PÇ ve AA-YFC betonlarının yangın dayanımı konusundaki araştırmalar yer almaktadır.

2.1 Alkalilerle Aktive Edilen Yüksek Fırın Cüruflu ve Metakaolinli Betonlar

2.1.1 Yüksek fırın cürufu

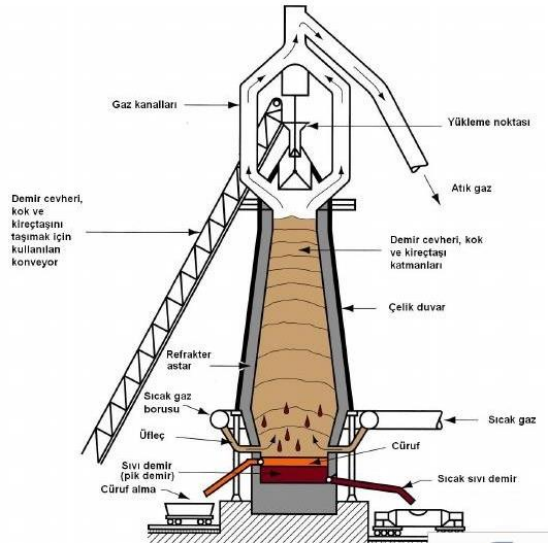
Yüksek fırın cürufu (YFC) demir üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Demir filizi gangı, kok ve kireçtaşının yanması sonucunda oluşan atıklar YFC'yi meydana getirir. YFC yavaş soğutulduğunda kristal bir yapı kazanır. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve beton agregası olarak kullanılabilir. Hızlı soğutma uygulaması sonucunda camsı yapıda cüruf elde edilir. Bu tür cüruflar granüle yüksek fırın cürufu olarak adlandırılırlar. YFC'nin hidrolik bağlayıcı özellik kazanabilmesi; cürufun kimyasal kompozisyonu, inceliği ve içerisindeki camsı yapı miktarına bağlıdır (Tokyay ve Erdoğdu, 2002). YFC ince öğütülmüş olarak beton üretiminde kullanıldığında, işlenebilirliği artırmakta, su ihtiyacını ve terlemeyi azaltmaktadır (Neville, 2000).

YFC'nin kimyasal bileşimi esas olarak kalsiyum oksit (CaO), silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşmaktadır. Ancak YFC'nin kimyasal bileşimi kadar kristal yapısı da önemlidir (Yalçın ve Gürü, 2006). YFC'nin aktivasyonunda etkin olan temel faktörler kalsiyum içeriği, tane boyutu ve karakteristikleri ile camsı madde bileşimi ve oranıdır (Zivica, 2006). YFC'nin fırın çıkışında hızla soğutulması ve en az 2/3 oranında camsı faz içermesi gerekir. Ayrıca içindeki CaO, MgO ve SiO_2

miktarlarıtoplamının en az 2/3 oranında ve (CaO + MgO) / SiO_2oranının ise 1'den fazla olması istenmektedir (Collins ve Sanjayan, 1999a). YFC'nin çimento ve beton sektöründe çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. YFC inşaat endüstrisinde genel olarak çimento ile kısmi oranlarda yer değiştirilerek kullanılmaktadır.

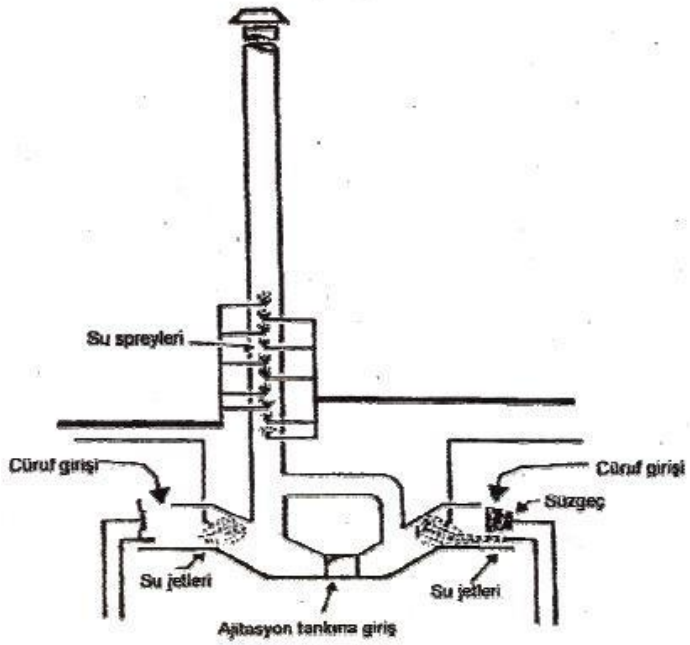
2.1.2 Yüksek fırın cürufunun üretimi

Yüksek fırın cürufu, yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında endüstriyel bir yan ürün olarak üretilmektedir. Demir cevherleri, hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), limonit ($Fe_3O_4.nH_2O$) ve siderit ($FeCO_3$) gibi demiroksit bileşenlerinin yanı sıra aynı zamanda küçük bir miktar silis, alümin, kil, kükürt, fosfor, mangan gibi yabancı maddeleri de bünyesinde barındırmaktadır. Cevher içerisindeki demirin elde edilebilmesi için cevherin, içerdiği yabancı maddelerden arındırılması ve demiroksitin ayrıştırılarak içerisindeki oksijenin çıkartılması gerekmektedir. Bunun için demir cevherleri, kalker taşı ile birlikte kok kömürü kullanılarak yüksek fırınlarda 1400-1600°C'ye kadar ısıtılmakta ve böylece demir, oksijen ve yabancı maddelerden arındırılmaktadır (Şekil 2.1). Demirin yoğunluğu yüksek olduğu için diğer maddeler eriyik halindeki demirin üzerinde yüzmektedir. Demir eriyiği ve üzerindeki maddeler iki ayrı çıkıştan alınarak birbirinden ayrılır. Bu yabancı maddeler topluluğu cüruf olarak adlandırılır (Erdoğan, 2003; Tokyay ve Erdoğdu, 2002; Topçu, 2006).



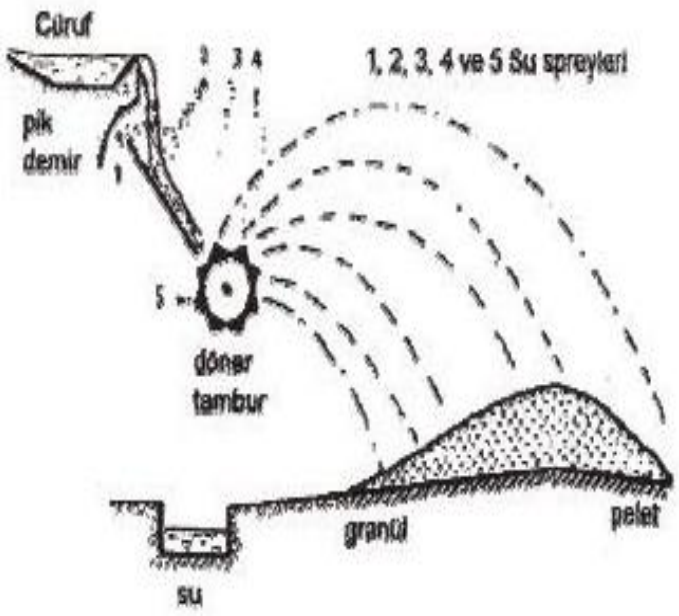
Şekil 2.1. Yüksek fırın cürufunun üretim şeması (Tokyay ve Erdoğdu, 2002)

Fırından çıkarılan cüruf yaklaşık olarak 1400-1600°C sıcaklıkta olduğu için, kullanılmadan önce soğutulması gerekmektedir. Cürufun özellikleri uygulanan soğutma tekniklerine bağlı olarak değişmektedir. Cürufun uygun bir forma getirilmesi ve bağlayıcı bir malzeme olarak kullanılması için granülasyon ve peletleme (hava granülasyonu) olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Her iki yöntemde de cürufun düzensiz bir camsı yapı kazanması için hızlı bir şekilde soğutulması esastır. Cürufun yavaş bir şekilde soğutulması durumunda ise, bağlayıcılık değeri olmayan kristal bir yapı ortaya çıkmaktadır (Newman ve Choo, 2003). Taş gibi sert bir malzemeye dönüşen gri renkli ve kristal yapılı bu cüruflar, kırılarak agrega haline getirildiğinde, hidrolik bağlayıcılık özellikleri bulunmadığından, yol dolgu malzemesi veya beton agregası olarak kullanılabilmektedir. Granülasyon yönteminde, erimiş haldeki cüruf yüksek basınçlı su fıskiyelerinin içinden geçirilir (Şekil 2.2). Böylece cüruf hızlı bir şekilde, en büyük tane büyüklüğü yaklaşık 5 mm olan camsı granüllere dönüşüp soğur. Buradaki su sıcaklığı yaklaşık olarak 50ºC'nin altında olup soğutma işlemi çok miktarda suyun püskürtülmesi (suyun kütlesi cürufun yaklaşık 10 katı) ile yapılmaktadır. Bu işlem sonucunda cüruf içinde kalan su miktarı yaklaşık olarak %30 civarındadır.



Şekil 2.2. Granülasyon yönteminin şematik gösterimi (Tokyay, 2002)

Peletleme yönteminde ise eriyik cüruf bir vibrasyon plakası üzerine dökülmekte ve bu işlemle genleşen cüruf bir miktar su püskürtülerek soğutulmaktadır (Şekil 2.3). Buradan yaklaşık 1 m çapında ve yüzgeç gibi çıkıntılara sahip dönen bir tambura aktarılan cüruf, bu tambur vasıtasıyla havaya fırlatılmakta ve havada çok çabuk soğutulma nedeniyle granülasyon elde edilmektedir. Bu yöntemde kullanılan su miktarı, 1 ton cüruf için yaklaşık $1m^3$'tür. Bu işlem sonunda cüruf içinde kalan su miktarı ise %10'un altındadır. Granülasyon metodu, yüksek camsı yapıya sahip cüruf üretiminde en etkili yöntemdir. Ancak, maliyeti peletleme yönteminden 6 kat daha fazladır (Newman ve Choo, 2003; Regourd, 1986).



Şekil 2.3. Peletleme yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğdu, 2002)

Ani olarak suya daldırma, basınçlı su püskürtülmesi veya peletleme yöntemleriyle granüle duruma getirilen cürufların içinde bulunan su, kurutucu değirmenler ya da filtreli havuzlar yardımıyla süzülmekte ve cüruflar, bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için geleneksel çimento öğütme değirmenlerinde çimento inceliğine kadar öğütülmektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları, PÇ'nin hidratasyonu sonucu ortaya çıkan $Ca(OH)_2$ ile birleştirildiğinde ya da alkali aktivatörlerle bir araya getirildiğinde hidrolik özelliğe sahip olurlar. Bu özellikleri sayesinde öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarını cüruflu çimentoların üretiminde ve betonda mineral katkı maddesi olarak kullanmak mümkün olmaktadır.

2.1.3 Alkalilerle aktive edilen yüksek fırın cüruflu (AA-YFC) betonlar

AA-YFC'li betonlar, bağlayıcı madde olarak PÇ yerine, alkalilerle aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının (YFC) beton içerisinde kullanılması suretiyle elde edilmektedir (Collins ve Sanjayan, 2001). Bu tip bağlayıcılar endüstriyel atıkların değerlendirilmesinden dolayı Portland çimentosuna kıyasla önemli ekonomik ve çevresel avantajlar sunmaktadır.

AA-YFC'li betonların basınç dayanımları çok yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Betonun dayanımı ve işlenebilirliği kullanılan alkalilerin içeriğine ve oranlarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Betonda alkalilerle aktive edilmiş YFC kullanıldığında kuruma rötresi artmaktadır ancak yüksek sıcaklıkta kür edilmesi rötreyi azaltabilmektedir. AA-YFC'li betonlar PÇ'li betonlarla kıyaslandığında, düşük hidratasyon ısısına, yüksek erken dayanıma ve agresif çevre koşullarında daha üstün durabiliteye sahiptir (Roy ve Idorn, 1982).

AA-YFC bağlayıcılarında ana hidratasyon ürünü, düşük C/S oranlı ve değişen derecelerde kristaliniteye sahip C-S-H'tır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3), sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum sülfat (Na_2SO_4), potasyum sülfat (K_2SO_4), kireç ve bunların çeşitli bileşenleri kullanılmaktadır. Genellikle kullanılan aktivatörler, sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum sülfattır. En etkili ve en yaygın olarak kullanılan aktivatör ise camsuyu olarak da bilinen sodyum silikattır (Wang ve Scrivener, 1995). Sodyum silikatın aktivasyonu etkileyen en önemli özelliği silika modülü (Ms)'dür. Ms, karışım içindeki ağırlıkça SiO_2/Na_2O oranıdır. Ticari olarak üretilen silikatlarda bu oran 1,5-3,2 arasındadır. Aktivatörün etkinliği birçok faktöre bağlıdır; ancak aktivatör tipi, dozajı, ortam sıcaklığı ve su/YFC oranı en önemli olanlarıdır (Zivica, 2006; Bakharev vd., 1999a).

2.1.4 AA-YFC bağlayıcılı betonların avantajları

AA-YFC'li betonlar PÇ'li betonlara kıyasla önemli teknik avantajlara sahiptir. Bunlar; daha erken ve daha yüksek mekanik özellikler, düşük hidratasyon ısısı, düşük porozite,

düşük permeabilite, hidratların düşük çözünürlüğü,kimyasal etkilere ve karbonatlaşmaya daha yüksek dayanıklılık, donma-çözülme etkilerine daha yüksek dayanıklılık, yüksek klorür difüzyon hızlarından kaynaklanan etkilere dayanıklılık, daha iyi agrega-matris ara yüzeyi oluşumu olarak sayılabilir (Bakharev vd., 1999b).

2.1.5 AA-YFC bağlayıcılı betonların dezavantajları

AA-YFC'li betonların hızlı priz, yüksek rötre, ilerleyen dönemlerde mikro çatlak oluşumu, çiçeklenme gibi dezavantajları vardır. Ayrıca, bazı araştırmalarda bu bağlayıcıların alkali-agrega reaksiyonu nedeniyle genleşme oluşturabilme olasılığının daha fazla olduğu ileri sürülmektedir (Zivica, 2006; Jimenez vd.,1999).

2.1.6 AA-YFC bağlayıcılı betonların tarihsel gelişimi

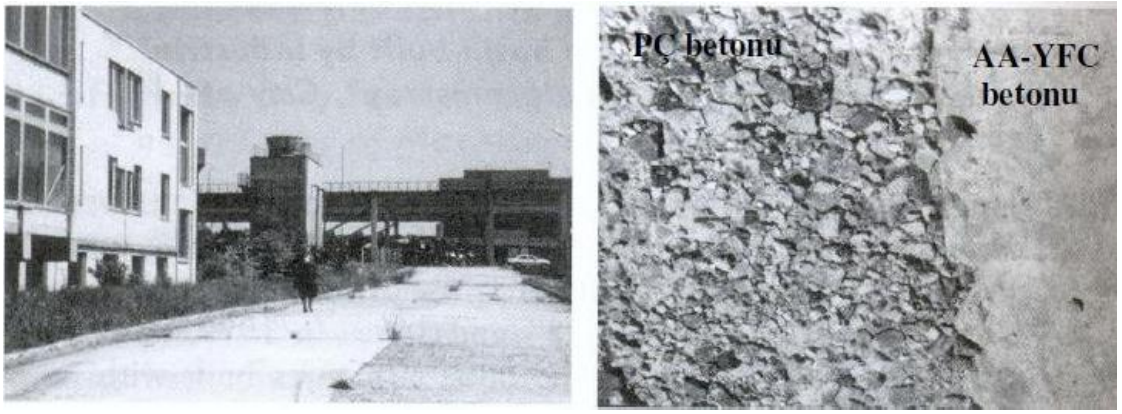
Yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyonu ile ilgili çalışmalar eski Sovyetler Birliği, İskandinavya ve Doğu Avrupa ülkelerinde uzun bir geçmişe sahiptir. Davidovits (1994), kaolin, kireçtaşı ve dolomitin sinterlenmiş ürünlerini, alüminosilikat bileşen olarak kullanarak alkalin bağlayıcılar üretmiş ve patent almıştır. Bu bağlayıcılar "jeopolimer" olarak adlandırılmış ve "pyrament" ve diğer ticari isimlerle piyasada satışa sunulmuştur. Finlandiya'da Forss'un "F-cement" ve Ukrayna'da Krivenko'nun "geocements" bağlayıcıları bu kategoriye girmektedir. Özellikle "geocements" adlı bağlayıcının hidratasyon ürünleri doğal minerallere oldukça benzerdir (Roy, 1999). Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar keşfedildikten sonra, eski Sovyetler Birliği, Çin ve bazı diğer ülkelerde ticari olarak üretilmiş ve çeşitli inşaat uygulamalarında kullanılmıştır.

1986-1994 yılları arasında "Tsentrmetallurgremont" sanayi şirketi AA-YFC betonlarından çeşitli çok katlı konut inşaatları yapmıştır (Şekil 2.4). Rusya'nın Lipetsk şehrindeki 16, 20 ve 24 katlı binaların dış duvarları yerinde dökme AA-YFC betonu ile yapılmıştır. Kat döşemeleri, merdivenler ve diğer kısımları ise prefabrik AA-YFC betonu ile üretilmiştir. YFC dozajı 450 kg/m^3 olup aktivatör olarak soda çözeltisi kullanılmıştır. Betonların proje dayanımı 25 MPa'dır. 2000 yılında bu yapılar tekrar incelendiğinde, dayanım açısından proje dayanımının aşıldığı, beton yüzeyinde çatlama ve bozulmanın oluşmadığı görülmüştür (Jimenez vd., 1999).

Şekil 2.4. AA-YFC betonu ile inşa edilmiş bina (Shi vd., 2006)

1974 yılında Polonya'nın Krakow şehrinde, duvar panelleri ve kat döşemeleri AA-YFC betonundan imal edilmiş bir depo yapılmıştır. Aktivatör olarak Na_2CO_3 kullanılmıştır. FC dozajı ise 300kg/m^3'tür. Prefabrik olarak üretilen elemanlar 70ºC sıcaklıkta 6 saat süreyle kür edilmiştir. Binanın dış kısmındaki panel elemanlardan alınan karotlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda 28. günde 23 MPa olan basınç dayanımının 27 yılda 43 MPa seviyesinde olduğunu göstermiştir. Karbonatlaşma derinliği ise 27 yılda 11 mm olarak bulunmuştur. Yapıdan alınan beton örnekler incelendiğinde, ana hidratasyon ürünü olarak yoğun C-S-H fazı tespit edilmiştir. Mikro çatlak görülmemiş, hamur-agrega ara yüzeyinin çok yoğun olduğu ve donatılarda korozyon oluşmadığı gözlemlenmiştir (Shi vd., 2006).

Ukrayna'nın Ternopil şehrinde endüstriyel bir bölgede 1984-1990 yılları arasında yapılan yollarda AA-YFC betonu kullanılmıştır. 1999 yılında aynı bölgede ve aynı zamanda yapılmış olan PÇ betonları ile AA-YFC betonları karşılaştırıldığında, AA-YFC betonlarının dayanıklılığını korurken, PÇ'li betonların ciddi şekilde hasar gördüğü belirtilmiştir (Şekil 2.5).



a b

Şekil 2.5. AA-YFC betonu (a) ve PÇ betonu (b) ile üretilmiş yollar (Shi vd., 2006)

1982 yılında Ukrayna'da betonarme panel elemanlardan oluşan bir yem deposunda AA-YFC betonu kullanılmıştır. Aktivatör olarak, soda-potasyum çözeltisi kullanılmıştır. Proje dayanımı 30 MPa olan yapıdan 18 yıl sonra alınan numunelerin dayanım değerinin 39 MPa olduğu görülmüştür. AA-YFC betonları ile üretilen panellerde 18 yıl sonra herhangi bir bozulma oluşmazken, PÇ ile üretilen panel betonlarında bozulma ve donatılarda paslanma oluşmuştur (Shi vd.,2006).

2.1.7 AA-YFC bağlayıcılı betonlar konusunda yapılmış çalışmalar

Bakharev vd. (1999a), YFC'nin değişik modül ve konsantrasyonlardaki farklı aktivatörlerle aktive edilmesi üzerine yaptıkları araştırmada, en iyi aktivasyonu sodyum silikatın sağladığını bildirmişlerdir. Yüksek silika modüllerinde, erken mukavemet azalırken, priz süresi de önemli bir şekilde kısalmaktadır. Yüksek oranda alkali içeriğine sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen YFC'li betonların yüksek rötre değerleri gösterdiği gözlenmiştir.

Jimenez vd. (1999), cürufların aktivasyonunda kullanılan alkali aktivatör yapısının çok önemli olduğunu bildirerek, elde ettikleri mukavemet değerlerine göre aktivatörleri Na_2SiO_3+NaOH>>Na_2CO_3>NaOH şeklinde sıralamışlardır. Alkalilerle aktive edilmiş YFC kullanıldığında beton basınç dayanımları 90 günde 60 MPa'a kadar ulaşmıştır. Elastisite modülü azalmış, eğilme dayanımı ise 7 MPa değerine ulaşmıştır.

Shi ve Day (1999), doğru alkali aktivatör seçildiği takdirde, alkalilerle aktive edilmiş

cüruflu bağlayıcıların erken ve son dönemdeki mukavemetlerinin, ilk dayanımı yüksek PÇ'li bağlayıcılardan daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Palacios ve Puertas (2005), NaOH ile aktive edilmiş YFC'li harçların eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerlerinin hem PÇ'li numunelerin hem de sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC'li harçların mukavemetinden daha düşük olduğunu bildirmişlerdir.

AA-YFC bağlayıcılı harçların özeliklerinin incelendiği bir çalışmada, üç farklı yüksek fırın cürufu çeşitli oranlarda kullanılmıştır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum silikat kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en etkili aktivatör türünün sodyum hidroksit-sodyum karbonat karışımı olduğu görülmüştür. Belirli bir dayanıma ve dayanıklılığa ulaşmak amacıyla, YFC'nin çimento ile %75-100 arasında yer değiştirilerek kullanılabileceği belirtilmiştir (Canbaz,2008).

Bilim (2006), sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş YFC'li harçların sodyum hidroksit ve sodyum karbonat kullanılarak aktive edilen harçlara göre daha yüksek dayanımlar sergilediğini belirtmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, AA-YFC'li numunelerin, PÇ'li numunelere göre oldukça yüksek kuruma rötresine sahip olduğu ve kuru kür şartlarından daha fazla etkilendiği görülmüştür.

AA-YFC'li kütle betonlarının dayanım ve rötresinin incelendiği bir çalışmada YFC, çimento ile %50-100 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır (Collins ve Sanjayan, 1999b). Aktivatör olarak toz halinde sodyum silikat kullanılmıştır. YFC oranının %100 olduğu karışımlarda işlenebilirlik artmış ve çökme kaybı azalmıştır. PÇ'lu betonlarda çatlak görülürken, AA-YFC'li betonlarda çatlak görülmemiştir. Ayrıca AA-YFC'li betonların çekme dayanımlarının PÇ'li betonlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Bakharev vd. (1999a), sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak AA-YFC'li betonlar üzerinde uyguladıkları sıcak kürün erken yaşlardaki mukavemet gelişimini hızlandırdığını belirtmişlerdir. Ancak numunelerin ilerleyen yaşlardaki basınç mukavemetlerinin oda sıcaklığında kür edilen numunelere göre düştüğü görülmüştür. Araştırmacılar bu durumun AA-YFC'li betonların mikroyapılarındaki heterojen dağılım sonucunda ortaya çıkan iri boşluk yapısından ileri geldiğini bildirmişlerdir.

Zivica (2006), aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum silikatın kullanıldığı bir çalışmada sıcaklığın artmasının prizi hızlandırdığını belirtmiştir. Alkali aktive edilmiş YFC karışımlarında priz hızlı olmakla beraber, aktivatör olarak sodyum silikat kullanılması ile bu hızlanma etkisi artarken, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat kullanılması durumunda bu etki azalmıştır.

Alkalilerle aktive edilmiş YFC'li betonlar PÇ'li betonlara göre daha yüksek karbonatlaşma değerleri göstermektedir. Kuruma nedeniyle AA-YFC betonlarında oluşan çatlaklar özellikle düşük bağıl nemlerde karbonatlaşmanın hızlanmasına neden olmaktadır (Byfors vd., 1989).

AA-YFC betonları, aktivasyonda kullanılan önemli miktardaki alkali içeriğinden dolayı PÇ'li betonlara göre alkali agrega reaksiyonundan meydana gelen genleşme ve çatlamalara karşı daha duyarlıdır (Gifford ve Gillot 1996; Jimenez ve Puertas, 2002).

Betonların alkali agrega reaksiyonları neticesindeki bozulma mekanizması, reaktif agregaların yakınında meydana gelen alkali silika jellerinin gelişimi, genleşmesi ve nihayetinde betonun çatlaması ile kendini göstermektedir. YFC'li betonlarda ortaya çıkan bu genleşmeler, hızlı mukavemet gelişimi ile bir miktar azaltılabilmektedir (Bakharev vd., 2001).

AA-YFC'li betonlarda donma çözülme sonrası ağırlık kayıpları PÇ'li betonlara yakın olarak bulunmuştur. Hava sürükleme sonucunda PÇ'li betonlara benzer olarak donma çözülme direnci ve işlenebilirlik artmıştır (Shi ve Day, 1999).

AA-YFC'li betonların PÇ'li betonlara göre daha yüksek kuruma rötresi değerleri sergilediğini bildiren Collins ve Sanjayan (1999), bunun muhtemel nedeninin AA-YFC betonlarındaki orta ölçekli boşlukların PÇ'li betonlara göre daha fazla olmasından ileri geldiğini belirtmişlerdir. AA-YFC'li betonların kuruma esnasındaki nem ve ağırlık kayıpları PÇ'li betonlara göre daha az olmasına rağmen, rötre birim şekil değiştirmelerinin büyüklüğünün daha fazla olduğu belirtilmiştir. Kuruma esnasında ortaya çıkan kapiler çekme kuvvetleri rötrenin artmasına sebep olmaktadır.

PÇ'li betonların yapısında bulunan $Ca(OH)_2$ bu betonların yüksek sıcaklık

dayanıklılığını önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. PÇ'li betonlarda 300°C civarında $Ca(OH)_2$ kristalleri çevresinde oluşan çatlakların ortadan kalkması, 400-600°C'de $Ca(OH)_2$'in ayrışması ile açığa çıkan CaO'in yeniden hidrate olması %44 hacim artışına, bunun sonucunda da önemli çatlak oluşumlarına ve dayanım kayıplarına neden olmaktadır. AA-YFC betonlarında $Ca(OH)_2$ olmaması bu zararlı dönüşümün etkilerini ortadan kaldırmaktadır (Aydın, 2010). Bununla beraber, AA-YFC betonlarında kapiler porozitenin düşük olması, patlayarak parçalanma riskini arttırmaktadır. Bu problem polipropilen liflerin kullanımı ile ortadan kaldırılabilmektedir (Shi vd., 2006).

İncelenen çalışmalar sonucunda YFC'nin alkalilerle aktive edilerek çimento yerine bağlayıcı olarak yüksek oranlarda kullanılabileceği görülmüştür. AA-YFC'li bağlayıcılarla üretilen betonun kimyasal etkiler altındaki performansı ve işlenebilirliği artırmakta, geçirimliliği azalmaktadır. Ancak AA-YFC'li betonların üretimi sırasında karbonatlaşmaya karşı önlem alınması, soğuk havalarda beton dökülmesi durumunda priz hızlandırıcının katılması, donma-çözülme etkisine karşı gerekli önlemlerin alınması gereklidir.

2.1.8 Metakaolin

Metakaolin, saflaştırılmış kaolin veya kaolinit killerinin belirli bir sıcaklık aralığında yakılması ve sonrasında yüksek incelik değerlerine kadar öğütülmesi sonucu elde edilen bir reaktif alümino-silikat puzolanıdır (Vu, 2002). Beyaz renkli ve amorf yapılıdır.

Kalsinasyon işleminde, kil mineralleri 100-200ºC civarında absorbe sularını kaybederler. 500-800°C sıcaklıkta ise kaolin kili dehidrolize olarak bağlı suyunun%14'ünü kaybeder ve metakaoline dönüşür (Abdul Razak ve Wong, 2005; Souza ve Dal Molin, 2005).

Kimyasal olarak metakaolinin temel bileşenleri SiO_2 ve Al_2O_3'tür. Bununla birlikte az miktarlarda Fe_2O_3, TiO_2, Na_2O ve K_2O bileşenleri de bulunur. Metakaolin mineral katkı olarak kullanılması sonucunda, içeriğindeki SiO_2 ve $Al2O_3$ miktarına bağlı olarak çimento ve betonun özelliklerini iyileştirmektedir.

Metakaolin beton karışımına eklendiği zaman, hidratasyon süresince meydana gelenana kimyasal reaksiyonlar metakaolin ile $Ca(OH)_2$'in arasında gerçekleşir. Yeni kristal ürünlerin puzolanik reaksiyonlar sonucunda oluşumu, $Ca(OH)_2$ içeriğini azaltır ve hamur ve betonun yapısını, özellikle agrega ile matris arasındaki ara yüzeyini geliştirir, toplam poroziteyi ve boşluk boyut dağılımını etkiler (Vu, 2002).

2.1.8.1 Metakaolinin çimento ve beton üretiminde kullanımı

Metakaolin ilk olarak 1962 yılında Brezilya'daki Jupia Barajı'nın inşaatında PÇ ile kısmi olarak yer değiştirilerek kullanılmıştır. 1980'lerde metakaolinin çimento matrislerinde kullanılarak cam elyaf ve lifle takviye edilmiş bileşikler oluşturmasına yönelik birçok araştırma yapılmıştır.

1990'larda ise metakaolinin betonda kullanımı yaygınlaşmıştır (Pera, 2001). Günümüzde metakaolin normal ve yüksek performanslı beton ve harç üretiminde kullanılmaktadır.

2.1.8.2 Metakaolinin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi

Metakaolin çimentonun normal kıvamını yükseltir. Bu etkisi metakaolinin kökeni ve inceliğine bağlıdır. Metakaolin çeşitlerindeki kalsinasyon sıcaklık ve sürelerindeki farklılık, metakaolin karıştırılmış çimento harçlarındaki normal kıvamların farklılaşmasına yol açmaktadır. İnceliğin aşırı olması nedeniyle metakaolinin su ihtiyacı oldukça fazladır. Ancak harç ve beton içerisinde oluşabilecek agrega segregasyonu riskini arttırmaz.

Betona metakaolin ilavesi basınç ve eğilme dayanımını, kimyasallara dayanımını ve alkali-silika dayanımını artırmaktadır (Hamalı, 2007). Metakaolin PÇ'nin hidratasyon sürecine etki eden yeni bağlayıcı bileşiklerin oluşumuna yol açar. Buna ek olarak metakaolinin inceliğinin PÇ'den fazla olması sebebiyle, boşlukları doldurarak daha yüksek yoğunluk ve mukavemet sağlamaktadır (Vu, 2002).

2.2 Atık PET Agregalı Betonlar

Bu bölümde atık PET şişe kırıklarının beton üretiminde agrega olarak kullanımına ilişkin literatür taramasına yer verilmiştir.

2.2.1 Plastik atık çeşitleri ile ilgili genel bilgiler

Plastik, petrol esaslı ürünler ile doğalgazı hammadde olarak kullanarak, bunların kimyasal dönüşümleri ile elde edilen madde gruplarından birisidir. Dünyada üretilen petrolün %4'ü plastik üretiminde kullanılmaktadır. Bu plastiğin %20-25'i ise ambalaj sektöründe kullanılmaktadır (Pehlivan vd., 2004). Plastiklerin ambalaj malzemesi olarak tercih edilmesini sağlayan avantajlarının başında; hafif ve esnek olmaları, kolay şekil verilebilmeleri, ısı ve elektrik izolasyonu sağlamaları gibi özellikleri gelmektedir. Sosyo ekonomik özellikler, tüketim çeşitlilikleri ve atık yönetim programlarındaki farklılıklardan dolayı her ülkenin atık kompozisyonu farklıdır. Ancak, genel olarak plastikler diğer atıklar içinde en fazla yeri tutmaktadır. Plastikler en çok paketleme ve inşaat endüstrilerinde kullanılmaktadır. Plastik atıklar içinde en çok yer tutanlar Polietilen Tereftalat (PET), Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil Klorür (PVC) ve Polistrendir (PS) (Gavela vd., 2004). Bu malzemelerin kullanıldığı alanlar aşağıda belirtilmiştir:

- Polietilen Tereftalat (PET); su, meşrubat ve yağ şişelerinin ambalajlanmasında kullanılmaktadır.
- Polietilen (PE); çamaşır suyu, deterjan ve şampuan şişeleri, motor yağı şişeleri, varil ve bidon üretiminde kullanılmaktadır.
- Polipropilen (PP), çuval, sentetik elyaf, margarin kabı ve deterjan kutularının kapaklarını üretmede kullanılmaktadır.
- Polivinil Klorür (PVC), profil, lambri ve boruların üretiminde, sıvı deterjan ve kozmetik ürünlerinin ambalajlarında kullanılmaktadır.
- Polistren (PS), yoğurt ve margarin kaplarında kullanılmaktadır.

2.2.2 Polietilen tereftalat (PET)

PET, termoplastik polyester reçinesi özellikteki bir ambalaj malzemesidir. Polyester kelimesi Yunanca pek çok anlamına gelen “Poly” ve asitlerin alkollere etkisiyle elde edilen bir bileşik olan “ester” kelimelerinden türemiştir. PET Polyester; alkol, etilen glikol (EG), asit ve teraftalik asit (TPA)’ten oluşmuştur ve kimyasal ismi Polietilen Tereftalat (PET)’tır.

PET’i oluşturan ham maddeler ham petrolden elde edilir. Rafine işlemlerinden sonra, ham petrol çeşitli petrol ürünlerine dönüştürülür ve iki tane PET hammaddesi elde edilir. Bu hammaddeler arıtıldıktan sonra bir katalizör yardımıyla kanal şeklindeki bir fırında 300ºC’ye kadar ısıtılır. Kimyasal reaksiyon sırasında oluşan çok sayıdaki tekil moleküller (monomerler) birbirleriyle ester bağlarıyla birleşerek polimerleri oluştururlar. Reaksiyonlar ilerledikçe karışım oldukça koyu bir kıvama gelmeye başlar ve sonunda uygun bir kıvama ulaşır. Bu aşamada reaktörden makarnaya benzer şekilde çıkan PET çubuklar su altında hızlı bir şekilde soğutulur ve sonra küçük tanecikler halinde kesilir. PET’in içecek şişesi olarak kullanılacağı durumlarda, içlerinde bulunan bazı yabancı maddelerin damıtılması ve fiziksel özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla, bu katı tanecikler erime noktasının altındaki değerlere kadar ısıtılır (Plastics Europe, 2008).

2.2.3 Atık PET agregalı betonlar konusunda yapılmış çalışmalar

İnşaat teknolojisinin vazgeçilmez malzemesi olan beton yapımı için çok miktarda doğal agregaya ihtiyaç duyulmaktadır. Atık plastiklerin hafif betonda agrega olarak kullanılmasıyla, hem doğal agregadan tasarruf edilmiş olunmaktadır, hem de atık plastiklerin ekonomik olarak geri dönüşümü sağlanmaktadır. Bu bölümde atık PET kırıklarının beton üretiminde agrega olarak kullanıldığı çalışmalar yer almaktadır.

Koide vd. (2002), atık plastiklerin sıkıştırılarak kırılmasıyla elde edilen geri kazanılmış agregaları beton üretiminde kaba agrega olarak kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan plastik agrega içeriğinde %85 oranında PET, %15 oranında Polipropilen (PP) ve Polietilen (PE) bulunmaktadır. Deneylerde bağlayıcı olarak PÇ ve doğal ince agrega kullanılmıştır. Plastik agregalı hafif betonların 28 günlük basınç dayanımları 20 MPa

seviyesindedir ve doygun yüzey kuru ağırlıkları 1.85 gr/cm^3 civarındadır. Elde edilen hafif beton yaklaşık 60°C civarında sıcaklık dayanımına ve donma-çözülme dayanımına sahiptir. Atık plastik agreganın kullanılmasıyla, betonun ağırlığı oldukça azaltılmıştır. Plastik agrega neredeyse hiç su emmediği için, agrega içindeki nemin kolaylıkla kontrol edilebilmesi mümkün olmuştur. Elde edilen hafif betonun strüktürel uygulamalarda kullanılabileceği belirtilmektedir. Ancak plastik agrega ile çimento hamuru arasındaki bağlantının zayıf olmasından dolayı dayanımların doğal agregalı betonlara göre daha düşük olduğu belirtilmiştir. Araştırmanın sonucunda atık PET ve PP'nin sıcak koşullardaki davranışları dikkate alınarak, strüktürel uygulamalarda beton agregası olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Akçaözoğlu vd. (2010), atık PET agregalı hafif harçların dayanım özelliklerini incelemişlerdir. İki grup harç numune üzerinde yürütülen çalışmada, atık PET agrega normal agrega ile kısmen ve tamamen yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çalışmada YFC çimento ile kısmi olarak yer değiştirilerek kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan atık PET agrega- bağlayıcı oranı 0.50'dir. Çalışma kapsamında üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 20 MPa ve üzerinde, eğilme dayanımları ise 4.7 MPa ve üzerinde çıkmıştır. Üretilen numunelerin taşıyıcı hafif beton sınıfına girdiği belirtilmektedir.

Frigione (2010), atık PET şişe kırıklarını beton üretiminde ince agrega olarak kullanmıştır. Atık PET agrega yer değiştirme oranı %5'tir. Kullanılan su-çimento oranları 0.45 ve 0.55'tir. Deney sonuçları, atık PET agregalı betonun işlenebilirliğinin normal betona benzer olduğunu göstermiştir. Üretilen beton numunelerin basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı kontrol betonundan sırasıyla %0.4 ve %1.9 oranlarında düşük çıkmıştır.

Albano vd. (2009), atık PET agrega içeren betonun mekanik davranışlarını incelemiştir. Atık PET agreganın doğal agrega ile yer değiştirme oranları %10 ve %20'dir. PET kırıklarının tane büyüklüğü 0.26-1.14 cm arasındadır. Deney sonuçları atık PET agrega miktarı ve tane boyutu büyüdükçe basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve elastisite modülünün düştüğünü göstermiştir.

2.3 Betonun Yangın Dayanımı

Bu bölümde yüksek sıcaklığın PÇ'li ve AA-YFC'li betonların özellikleri üzerindeki etkileri açıklanmıştır.

2.3.1 Yangın

Yanma, yakacakların oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek, yakacak içinde depolanmış bulunan enerjinin, ısı enerjisi biçiminde açığa çıktığı kimyasal bir işlemdir. Bu işlem sırasında çıkan enerji, genellikle sıcak gazlar şeklinde olmasına rağmen, çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık), elektrik (serbest iyonlar ve elektronlar) ve mekanik (ses) enerjiler şeklinde de ortaya çıkmaktadır. Yanma, yanıcı maddelerin oksijen ile kimyasal reaksiyon hızına, oksijen miktarına ve yanma bölgesindeki sıcaklığa bağlıdır.

Yüksek sıcaklığa sebep olan yangın ise katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır. Araştırmalar, tabii bir yangının genel olarak ateşleme, yavaş yanma, ısınma ve soğuma olmak üzere dört fazdan oluştuğunu göstermektedir. Ateşleme ve yanma fazları tüm-parlama öncesi (pre-flashover), ısınma ve soğuma fazları ise tüm-parlama sonrası (post-flashover) fazları olarak adlandırılmaktadır. Tüm-parlama öncesi fazı gelişmekte olan yangın, tüm-parlama sonrası fazı ise gelişmiş olan yangın durumunu göstermektedir (Ashrae, 1997).

2.3.2 Yüksek sıcaklığın PÇ'li betona etkileri

Beton, yanmayan madde oluşu, yangın esnasında belirli bir süre için önemli bir zarar görmemesi ve zehirli duman çıkarmaması gibi özellikleri ile yangın direnci yüksek bir malzemedir (Neville, 2000). Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir (Baradan vd., 2002).

Yüksek sıcaklık etkisinde betonda parça atmalar oluşmakta ve yapı elemanı yük taşıma kapasitesini ve bütünlüğünü kaybetmektedir. Parça atması sonucunda donatıların yüksek sıcaklığa maruz kalması sorunu ortaya çıkmaktadır. Parça atmalarını azaltmak için termal bariyerler, polipropilen lifler, hava sürükleyici katkılar, büyük boyutlu

elemanlar ve düşük termal genleşmeye sahip agregalar kullanmak gerekir. Hava sürükleyici katkılar nem içeriğini ve boşlukların miktarını artırarak boşluk basıncını düşürmektedir.

Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak da değişir (Akman, 2000; Baradan vd., 2002; Riley, 1991). Nispeten büyük boyutlu beton elemanları yüksek sıcaklık karşısında, yapının son durumunu önemli derecede etkileyen iyi bir eğilim gösterirler. Bu nedenle betonda mikro yapısal değişiklikler göz önünde tutulduğunda malzemenin homojen olmaması ve elemanların geometrisi hesaba katılması gereken iki önemli unsurdur. Gerçek bir yangında beton elemanın geometrisi ve boyutları kritik bir rol oynamaktadır (Andrade vd., 2003). Beton, farklı termal karakteristiklere sahip bileşenleri ile nem ve poroziteden dolayı yüksek sıcaklık karşısında karmaşık bir davranış sergiler. Betonun yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı, çimento hamuru, agregalar ve mineral katkı maddeleri gibi bileşenlerine göre ayrıntılı olarak aşağıda açıklanmıştır.

2.3.2.1 Çimento hamuru

Çimento hamuru ilk ısıtma boyunca oldukça kararsız bir bileşendir, çünkü sıcaklık etkisi ile önemli fiziksel ve kimyasal dönüşümler geçirir. Bu dönüşümlerde, 100ºC ve altındaki sıcaklıklarda serbest suyun buharlaşması, 100ºC'den sonra kimyasal bozulma ve bağlı suyun kaybı önemli bir rol oynamaktadır (Scherefler vd., 2003).

Beton bünyesinde C-S-H jeli boşlukları, kapiler boşluklar ve hava boşlukları olmak üzere üç farklı boşluk türü bulunmaktadır. Betonun katı fazları çimento hamuru ve agregalar, yüksek sıcaklığa maruz kaldığında gözenek yapısını etkiler. Katı fazlarda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklikler toplam porozitede ve gözenek boyutunun dağılımında değişikliklere neden olur. Genellikle sertleşmiş çimento hamuru 20-200ºC civarında genleşir. 200ºC'nin üstünde farklı yoğunlukların etkisiyle büzülür, bu sırada da agregalar genleşir. Bütün bu değişiklikler gözenek boyutunun büyümesine sebep olur (Andrade vd., 2003). 500ºC sıcaklığa kadar kapiler ve jel suyunun ayrılması, toplam boşluk hacminde önemli bir artışa neden olur (Haddad ve Shannis, 2004). 600ºC'ye kadar toplam boşluk hacmi artar. Bu artış beklenenden fazladır ve ağırlık

kaybıyla benzerlik gösterir. Bunun nedeni ya katı fazın bozularak boşlukların artması ya da oluşan mikro çatlaklar olabilir. Yüksek sıcaklıklarda küçük boşlukların oranı azalır, bu da 900ºC'nin üzerindeki sıcaklıklarda sinterleşmeye neden olabilir (Andrade vd., 2003).

Yüksek termal gerilmelere maruz kalan betonlarda çatlak oluşumunun birçok nedeni vardır. Sertleşmiş çimento hamurundaki mevcut fazlar yüksek sıcaklıklar altında farklı deformasyonlar gösterir. Genelde, sıcaklıktaki artış ile bu fazların davranış biçimi iki sürecin sonucudur: Hidrate olmuş çimento fazlarının dehidratasyonu sonucu oluşan büzülme, $Ca(OH)_2$ ve hamurun hidrate olmamış bölümlerinin 450ºC'ye kadar genleşmesidir (Piesta, 1984).

Çimento hamurundaki başlangıç mikro çatlakların varlığı, sertleşirken oluşan rötrenin sonucudur. Bu çatlaklar yüksek sıcaklıklarda kolaylıkla ilerlerler. Bunların bazıları 200ºC'nin altındaki sıcaklıklarda yok olurlar, sonuçta az miktarda ama daha büyük çatlaklar oluşur. Anhidrit tanelerin etrafındaki mikro çatlaklar da bu sıcaklıkta gelişir. 300ºC civarında çimento fazını geçerler ve agregaları çevrelerler. Sıcaklık 500ºC'nin üzerindeyken, çatlaklar çimento hamurunda gelişir, boyutları 0,01 mm'den büyüktür. Ayrıca agregaları çatlatırlar, bunların boyutları ise 0,05 mm'den büyüktür ve bu seviyede çatlaklar gözle görülebilir (Andrade vd., 2003).

Çimento türüne ve üretim sırasındaki su/çimento oranına bağlı olarak, beton hacminin %4'ü kadar bulunabilen serbest su 100ºC'de, kimyasal bağlı su ise 300ºC'de buharlaşmaktadır. Sıcaklık etkisi ile bu mertebedeki suyun kaybı ile oluşacak büzülme ve beton içinde oluşan buhar basıncı, donatı beton örtüsünün çatlamasına ve parçalanarak kopmasına neden olur. Beton örtünün tahrip olması ile donatılar yangının başlangıcında sıcak gazlarla temasa geçebilir (Akman, 2000).

2.3.2.2 Agrega

Agregalar betonda %60-80 arasında bir hacmi oluştururlar. Özelliklerindeki farklılıklar, ısıtma sırasında betonun termal genleşme katsayısı ve termal iletkenliğini ve performansını önemli derecede etkiler. Agregaların yüksek sıcaklıkta betona etkisi mineral yapılarına bağlıdır ve yüksek sıcaklığa dayanıklı oldukları söylenebilir.

Silis esaslı agregalar için kritik sıcaklıklar 250ºC ile 575ºC arasıdır. Yüksek sıcaklıklarda karbon bileşimi ayrışır ve 1200ºC'de erir (Haddad ve Shannis, 2004). Kumların büyük çoğunluğunu teşkil eden kuvartz, 575ºC'de yaklaşık %5.7 civarında bir hacim artışı ve endotermik bir reaksiyonla α-kuvartzdan β-kuvartza dönüşür. Kalker ve dolomitten oluşan agregalar 700ºC'ye kadar kararlıdırlar (Andrade vd., 2003). 800-900ºC sıcaklıklarda CaO ve MgO'ya dönüşüm söz konusudur (Akman, 2000). Kalkerin ve dolomitin kalsinasyonu endotermik bir olaydır ve sıcaklığın etkisi ile CO_2'in ayrışması, MgO ve CaO'nun oluşması büzülmeye neden olur (Scherefler vd., 2003). Gerek soğuma esnasında ortamdaki nemin absorplanması, gerekse söndürme anında sıkılan suyun etkisiyle $Ca(OH)_2$ tekrar oluşur. Bu büzülme ve genleşmeler ciddi dayanım kayıplarına sebep olur.

Yaygın olarak kullanılan agregaların birçoğu belli sıcaklıklarda ısıtıldığında fiziksel olarak bozulur. Kireçtaşı agregaları 650ºC'ye kadar ısıtıldığında kalıcı termal genleşmeler gösterir. Karbonat kökenli agregalar 700ºC'nin üzerindeki sıcaklıklarda kimyasal olarak CaO ve CO_2'e ayrışır. Agregada görülen bütün bu kimyasal ve fiziksel değişiklikler, artan sıcaklıklarda betonda ciddi dayanım azalmalarıyla ile sonuçlanır. Bu nedenle, üretilen betonun yüksek sıcaklıklarda iyi performans göstermesi için uygun agreganın seçimi çok önemlidir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalacak beton için agrega seçiminde göz önünde bulundurulması gereken ilk kriter, agreganın hem fiziksel hem de kimyasal olarak termal kararlılığıdır (Khoury, 2003).

Çok ince kristal yapıya sahip veya kristal olmayan bazik malzemeler en iyi yangın dayanıklılığına sahip agrega olarak tanımlanmaktadır. Örneğin, kireçtaşı 900ºC'ye kadar durmadan genleşir, bu sıcaklığa ulaştığında, CO_2'in serbest bırakılması ile $CaCO_3$'ın ayrışmasından dolayı büzülmeye başlar. Bu ayrışmadan dolayı, kireçtaşı agregalı betonların bu sıcaklığın üzerinde yangın dayanıklılığına sahip olmadığı göz önünde tutulmalıdır (Neville, 2000).

Khoury'nin (2003) yapmış olduğu bir derlemede Abrams'ın (1971) çalışmasına yer verilmiş ve bu çalışmada üç farklı tür agreganın kullanıldığı beton numunelere yüksek sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 600ºC'ye kadar ısıtılan kalker esaslı ve hafif

agregalı betonların basınç dayanımlarının silis esaslı agregalara göre daha yüksek olduğunun gözlendiği belirtilmiştir. Granit ve bazalt gibi volkanik kayaçlar ise 1000ºC'ye kadar kararlı yapıda kalabilmektedir. Ancak sıcaklığın aniden artması ve azalması parçalanmalara neden olabilir.

Pomza, köpük cüruf ve genleştirilmiş kil ürünleri gibi hafif agregaların yangın dirençleri yüksektir (Shoaib vd., 2001). Genellikle silis içermeyen agregalar, örneğin kalker ve volkanik kökenli agregalar ile üretilen betonlar yüksek sıcaklık etkisine karşı daha dayanıklıdır (Postacıoğlu,1986).

2.3.2.3 Mineral katkı malzemeleri

Günümüzde betonun performansını artırmak amacıyla cüruf, uçucu kül, silis dumanı vb. puzolan malzemeler ve katkı maddeleri kullanılmaktadır. Puzolanlar yüksek sıcaklık etkisinde kalsiyum hidroksitleri tüketerek C-S-H oluşumuna katkıda bulunurlar (Haddad ve Shannis, 2004).

Ferrosilisyum ve silisyum metal endüstrisinin bir yan ürünü olan silis dumanı, çok ince oluşu nedeniyle çimento hamuru içindeki ve agrega-çimento hamuru ara yüzündeki boşlukları doldurur, betonda geçirimsizlik sağlar. Bünyesindeki aktif SiO_2 sayesinde silikatların hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksiti bağlayarak kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli oluşturur, kalsiyum hidroksitin erimesini önler (Yüzer vd., 2001).

Silis dumanı içeren betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç, katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişebilmektedir. Silis dumanı oranı %20'nin üzerinde olan yüksek dayanımlı betonların direnci normal betonlara göre daha azdır. Sıcaklık 300ºC'yi aştığında jel üzerinde adsorbe edilmiş su serbest hale geçmekte, yüksek performanslı betonlarda kılcal boşlukların boyutu küçük olduğundan bu boşluklarda buhar basıncı artmakta, betonda büyük gerilmeler oluşmaktadır. Ortaya çıkan basınç etkisi, betonda patlamalara ve dağılmalara neden olmaktadır.

2.3.3 Yüksek sıcaklığın betonun fiziksel özelliklerine etkileri

Yüksek sıcaklık; betonun ısı yayınımı, ısı iletkenliği, ısıl genleşmesi, özgül ısısı, birim

ağırlığı ve rengine etki etmektedir. Bu fiziksel değişimler sırasında betonun mekanik özelliklerinde de değişiklikler meydana gelir. Beton yüksek sıcaklık etkisinde kalırsa, düşük ısı iletkenliğine sahip yüzey tabakasının oluşması ile ısı yayınımı azalır. Bunun sonucunda, yüksek sıcaklığa maruz yüzey ile betonun iç kısımları arasında sıcaklık farkları oluşur.

Riley (1991) deneysel bir çalışmada, 30 mm çapında 60 mm yüksekliğinde silindir harç numuneleri yüzeyden itibaren ısıtmış ve sıcaklıkları 5 adet termokupl ile ölçerek izotermleri çizmiş ve bu noktalardan aldığı ince kesitlerin analizi ile betonun fiziksel özelliklerinin bu izotermlere benzer değişimler gösterdiğini belirtmiştir. Çatlak kısım bütün numunelerde, yüksek sıcaklığa maruz kalan yüzeyden itibaren 25-30 mm içeriye girmiştir. 300ºC'den daha düşük sıcaklığa maruz kalan bölgelerde yerel arayüz çatlakları, 300-500ºC arasında arayüz ve çimento pastasında, 500ºC'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise çimento pastasında ve agrega tanelerinde ciddi çatlaklar meydana gelmiştir. Bu seviye betonun anizotropik özelliğinin başlangıcıdır. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış bir betonda anizotropik özelliklerin gözlenmesinin, sıcaklığın 500ºC'yi aştığı anlamına geldiği belirtilmiştir.

Papayianni ve Valliasis (2005) tarafından 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindir beton numunelerde yüksek sıcaklık etkisi esnasında yapılan ölçümlerde, yüksüz durumda 400ºC'ye kadar büzülme daha sonra genleşme gözlenmiştir.

2.3.3.1 Isı iletim katsayısı

Betonun ısı iletimine etki eden temel unsur agrega türüdür. Kalker ve dolomit esaslı agregalarla üretilen betonun ısı iletim katsayısı (λ) büyük değerler almaz. Buna karşın silis esaslı agreganın kullanıldığı betonda λ'nın %15-20 oranında daha büyük olduğu kabul edilir. Isı iletim katsayısına etki eden diğer iki önemli unsur, boşluk oranı ve boşluk yapısı ile su içeriğidir. Suyun ısıyı havaya göre daha fazla iletmesinden dolayı kuru haldeki bir cisimde gözeneklerin fazla olması λ'nın düşmesine yol açar. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan beton gözeneklerinden su kaybeder, çimentonun dehidratasyonu ile boşluklu bir yapıya dönüşür ve ısı iletim katsayısı azalır (Aköz ve Yüzer, 1994).

2.3.3.2 Isıl genleşme katsayısı

Malzemelerin şekil değiştirmesini etkileyen ısıya ilişkin bir diğer özelliği de ısıl genleşmesidir. Betonun genleşme katsayısı (α, 1/ºC), üretiminde kullanılan agregaların genleşmesine bağlıdır. Çimento hamurunun ısıl genleşme katsayısı (11.10^{-6}-20.10^{-6}.1/ºC) agregalardan daha büyüktür. Genleşme katsayısı (α) en düşük olan doğal taş kalkerdir. Sıcaklık arttıkça α artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda termik genleşmelerdeki farklılıklardan dolayı oluşan gerilmeler çimento hamuru ile agrega arayüzünde çatlamalara neden olur (Postacıoğlu,1986).

2.3.3.3 Özgül ısı

Betonun özgül ısısı; diğer bir deyişle bir gramının sıcaklığını 1ºC arttırmak için gerekli olan ısı enerjisi sıcaklıkla çok az değişir. Bu büyüklüğe agreganın önemli bir etkisi yoktur (Aköz ve Yüzer, 1994).

2.3.3.4 Birim hacim ağırlık

Sıcaklığın artması ile boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu ağırlık azalır, genleşme nedeniyle hacim artar. Porozite ve su içeriği betonun yangından sonraki hasar kontrol parametreleridir (Andrade vd, 2003). Isıtma sırasında betondaki ağırlık kaybı genellikle porozitenin artmasıyla sonuçlanır. Bu artış normal ve yüksek dayanımlı betonlar için yaklaşık doğrusal bir artıştır. Buna karşın ultra yüksek dayanımlı betonlar için bu geçerli değildir. Anhidrit çimento tanelerinin çokluğu ve kılcal boşlukların neredeyse olmaması, buharın açığa çıkmasını zorlaştıran nedenlerdir, fakat ağırlık kaybının derecesi arttıkça porozite etkili bir şekilde artar. Ağırlık ve hacimdeki bu değişimler sonucu betonun birim hacim ağırlığı (β) azalır. Ancak bu azalma ihmal edilebilir düzeydedir.

Silis dumanı ve uçucu kül mineral katkıları kullanılarak yapılan bir çalışmada, suda soğutma etkisi havada soğutmaya nazaran daha az boşluk kalmasını sağlamıştır. Suda soğutma, yüksek sıcaklık etkisinden sonra dehidrate olmuş çimento hamuru bileşenlerinin tekrar hidrate olmasını sağlayarak mikroyapı yoğunluğunun artmasına yardımcı olur (Andrade vd., 2003).

2.3.3.5 Yüksek sıcaklığın betonun rengine etkileri

Yüksek sıcaklığın etkisinde kalan betonun renginde değişiklikler meydana gelmektedir, Bu değişiklik özellikle silisli nehir agregaları ile üretilen betonlarda belirgin olarak görülmektedir. Örneğin betonun rengi pembe veya kırmızı ise sıcaklığın 300-600°C'ye, gri ise 600-900°C'ye kadar yükseldiği tahmin edilmektedir. Sıcaklık 600°C'ye ulaştığında beton, dayanımının %50'sini, 800°C'ye ulaştığında ise yaklaşık %80'ini kaybettiği göz önüne alınırsa, renk incelemesi ile betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığı, dolayısı ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir edinilebilir (Neville, 2000).

2.3.4 AA-YFC bağlayıcılı betonların yangın dayanımı

AA-YFC betonlarında kapiler porozitenin düşük olması sebebiyle yangın sırasında patlayarak parçalanma riski fazladır. Bu sorun polipropilen liflerin kullanımı ile ortadan kaldırılabilmektedir (Shi vd., 2006).

Topçu ve Canbaz (2009); 100, 400 ve 700°C sıcaklıklara maruz kalan, $NaOH+Na_2SiO_3$ ile aktive edilen harç numunelerin basınç dayanımlarını incelemiştir. Bağlayıcı olarak sadece YFC içeren harçların basınç dayanımları 400°C'ye kadar artmış, 700°C sıcaklıkta ise düşmüştür. $NaOH-Na_2SiO_3$ ile aktive edilmiş YFC'li harcın 700°C'ye maruz kaldıktan sonra aktivatör olarak $NaOH-NaCO_3$ kullanılan numunelere göre bağlayıcı kısımda bozulmaların ve boşlukların arttığı, aderansın azaldığı bildirilmiştir.

Aydın (2010), 40x40x160 mm boyutlu prizmatik numuneleri 3 saat süreyle 200-800ºC arasında sıcaklıklara maruz bırakmıştır. Yüksek sıcaklık etkisiyle numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. PÇ'li numuneler 400°C sıcaklığa maruz kaldığında hasar oluşumları başlamıştır. Bu sıcaklıkta 18 dakika bekleme sonucunda numuneler patlayarak parçalanmıştır. PÇ ile aynı su/bağlayıcı oranına sahip olan AA-PÇ karışımlı numuneler ise, patlayarak parçalanma davranışı göstermemiştir. Bu durum, matris fazı içerisine dağılmış çok sayıdaki nanometre boyutundaki boşluklardan kaynaklanmaktadır. Bu boşluklar, numune içerisinde buharlaşmaya çalışan suyun yarattığı içsel gerilmeleri sönümleyerek numunenin patlamasını engellemektedir.

Guerrieri ve Sanjayan (2010), alkali aktive edilen YFC ve uçucu kül karışımının yüksek

sıcaklık dayanımını incelemişlerdir. Numuneler 800°C sıcaklığa tabi tutularak, uçucu kül-YFC yer değişim oranının ve silika modülünün etkisi incelenmiştir. Başlangıç dayanımları düşük olan (<7.6 MPa) numunelerin 800°C sonrasında basınç dayanımları %90 oranında artmıştır. Bu durumun, başlangıçta reaksiyona girmemiş ürünlerin daha sonra hidratasyona girmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Başlangıç dayanımı 28 MPa olan numune yüksek sıcaklık sonrasında %70 dayanım kaybına uğrarken, başlangıçta 83 MPa seviyesinde dayanım sergileyen numune yüksek sıcaklık sonrasında %90 civarında dayanım kaybına uğramıştır.

Rashad vd. (2012), alkali aktive edilen YFC'li harçların 200-800°C arasında yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra kimyasal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deney sonuçları AA-YFC'li harçların, PÇ'lu numunelere göre 600°C sıcaklığa kadar bozulmaya karşı daha iyi direnç gösterdiğini ortaya koymuştur. Araştırmacılar, YFC'nin incelik değerinin ve alkali aktivatör dozajının artmasının numunelerin yangın dayanımını olumlu yönde etkilediğini bildirmişlerdir.

Rovnanik vd. (2013), 200-1200°C arasındaki sıcaklıklara maruz kalan AA-YFC betonunun mekanik özelliklerini ve mikro yapısını incelemişlerdir. Araştırmada numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarının 800°C'ye kadar artan yüksek sıcaklığa bağlı olarak düştüğü belirtilmiştir. Sıcaklık 800°C'nin üzerine çıktığında ise, numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarında hafif bir artış gözlenmiştir. Bu durumun, kristalleşme işlemi sırasında yeni ve daha güçlü bir seramik bağın ortaya çıkması nedeniyle oluştuğu belirtilmektedir.

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan malzemeler ve gerçekleştirilen deneyler yer almaktadır.

3.1 Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC)

Çalışmada kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) İskenderun Demir-Çelik Fabrikası'ndan elde edilmiştir (Fotoğraf 3.1). YFC'nin özgül ağırlığı ve özgül yüzeyi (Blaine) değerleri sırasıyla 2.81 gr/cm^3 ve 4250 cm^2/g'dır. 7 ve 28 günlük cüruf aktivite indeksleri ise sırasıyla % 61.5 ve % 86.5'tir (ASTM C-989, 1994). YFC'nin kimyasal oksit bileşimi Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Fotoğraf 3.1. Öğütülmüş YFC

3.1.2 Metakaolin (MK)

Karışımlarda Metamax adlı yüksek reaktiviteye sahip metakaolin (MK), YFC ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Kullanılan metakaolin ASTM C-618 (2012)'de belirtilen N sınıfı puzolan özelliklerini karşılamaktadır. Metakaolinin özgül ağırlığı 2.5 g/cm^3 tür. MK'nin kimyasal oksit bileşimi Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

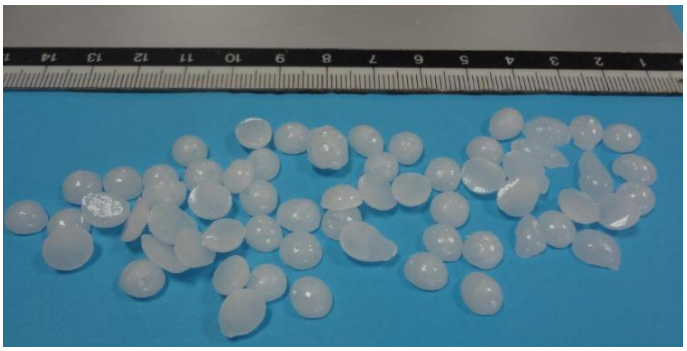
Çizelge 3.1. YFC ve MK'nin kimyasal oksit bileşimi

Oksit (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	KK
YFC	36.70	14.21	0.98	32.61	10.12	0.42	0.76	0.99	-
MK	51.6	40.18	1.21	1.15	0.20	0.98	0.63	0.03	-

3.1.3 Alkali aktivatör

Çalışmada kullanılan alkali aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH) ve sıvı sodyum silikattır (Na_2SiO_3). NaOH ve Na_2SiO_3, bağlayıcının ağırlıkça %4'ü oranında Na içerecek şekilde ve silikat modülü ($Ms=SiO_2/Na_2O$) 1 olacak şekilde belirlenen oranda karıştırılarak kullanılmıştır.

MERCK kimyasallarından temin edilen NaOH %97 saflıkta ve granül haldedir. Piyasada kostik olarak da bilinen NaOH, ucuz ve kolay temin edilebilen bir aktivatördür. Beyaz renkli ve katı halde olan NaOH 320°C'de erir, akkor derecede uçucudur, suda ısı yayarak çözünür ve nem kaparak bozunur (Fotoğraf 3.2). Potasyum hidroksitle aynı özellikleri gösteren fakat ondan daha az yakıcı olan güçlü bir bazdır. Kullanılan sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

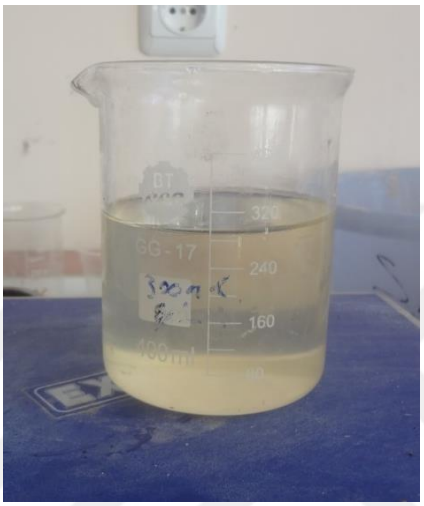


Fotoğraf 3.2. Sodyum hidroksit (NaOH)

Çizelge 3.2. Sodyum hidroksitin kimyasal kompozisyonu(%)

Asidimetrik	≥97
Na_2CO_3	≤1
CI	≤0.01
SO4	≤0.01
Pb	≤0.002
AI	≤0.002
Fe	≤0.002

Yüksek fırın cürufunu aktive etmek için kullanılan ve cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat (Na_2SiO_3) KİMETSAN kimyasallarından elde edilmiştir (Fotoğraf 3.3). Na_2SiO_3 çözeltisinin içeriğinde %23.57 oranında SiO_2 ve %11.45 oranında Na_2O bulunmaktadır. Sodyum silikat suda çözünen bir cam türüdür, yüksek erime noktasına sahiptir. Başta seramik olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. İstenilen miktarda bulunabilir ve ucuzdur.



Fotoğraf 3.3. Sodyum silikat (Na_2SiO_3)

3.1.4 Öğütülmemiş cüruf agrega

Çalışmada İskenderun Demir Çelik Fabrikası'nın atığı olan öğütülmemiş yüksek fırın cürufu, agrega olarak kullanılmıştır (Fotoğraf 3.4). Cüruf agreganın kuru özgül ağırlığı 2.29 g/cm^3, doygun yüzey özgül ağırlığı ise 2.49 g/cm^3'tür. Su emme kapasitesi ise %8.7 olarak bulunmuştur. Karışımda kullanılan öğütülmemiş cüruf agreganın elekten geçen miktarları Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Fotoğraf 3.4. Öğütülmemiş cüruf agrega

Çizelge 3.3. Öğütülmemiş cüruf agreganın eleklerden geçen miktarları

Elek genişliği (mm)	Elek üstünde kalan (gr)	Elek üstünde kalan (%)	Yığışımlı kalan (%)	Elekten geçen (%)
4	0	0	0,00	100,00
2	144,0	14,40	14,40	85,60
1	383,0	38,30	52,70	47,30
0,5	304,0	30,40	83,10	16,90
0,25	127,0	12,70	95,80	4,20
0,125	28,5	2,85	98,65	1,35
0,063	9,0	0,90	99,55	0,45
Tava	3,0	0,30	99,85	0,15
TOPLAM	998,5	0	0	0

3.1.5 Atık PET agrega

Karışımlarda agrega olarak kullanılan atık PET şişe kırıkları Adana SASA PET Şişe Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Atık PET şişeler toplanıp yıkandıktan sonra, fabrikadaki makinelerde küçük parçalar halinde kesilmektedir. Elde edilen PET şişe kırıkları çeşitli eleklerden geçirilerek geri dönüşüm uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu çalışmada, elek altı olarak tabir edilen ve maksimum tane büyüklüğü 4 mm olan atık PET şişe kırıkları agrega olarak kullanılmıştır (Fotoğraf 3.5). Atık PET agreganın özgül ağırlığı 1.27 g/cm^3'tür. Atık PET agreganın granülometrik dağılımı Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

Fotoğraf 3.5. Atık PET agrega

Çizelge 3.4. Atık PET agreganın eleklerden geçen miktarları

Elek genişliği (mm)	Elek üstünde kalan (gr)	Elek üstünde kalan (%)	Yığışımlı kalan (%)	Elekten geçen (%)
4	0,00	0,00	0,00	100,00
2	138,50	13,85	13,85	86,15
1	726,00	72,60	86,45	13,55
0,5	115,50	11,55	98,00	2,00
0,25	16,00	1,60	99,60	0,40
0,125	3,50	0,35	99,95	0,05
0,063	0,50	0,05	100,00	0,00
Tava	0,00	0,00	100,00	0,00
TOPLAM	1000,00			

3.1.6 Karışım ve bakım suyu

Deneylerde kullanılan karışım ve bakım suyu şehir şebekesinden alınan içme suyudur. Beton karışım ve bakım suyunun kalitesi ile ilgili Türk Standardı TS EN 1008 (2003) olup karma ve bakım suyu, genel anlamda içilebilir su olarak ifade edilmektedir.

3.2 Karışım Oranları ve Numunelerin Üretimi

Hazırlanan harç karışımların su/bağlayıcı oranı 0.50 olup agrega-bağlayıcı oranı ise 2.75'tir. Karışımlarda bağlayıcı olarak YFC ve YFC-MK karışımı kullanılmıştır. YFC-MK karışımlı numunelerde MK, YFC ile ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Karışımlarda agrega olarak öğütülmemiş cüruf agrega

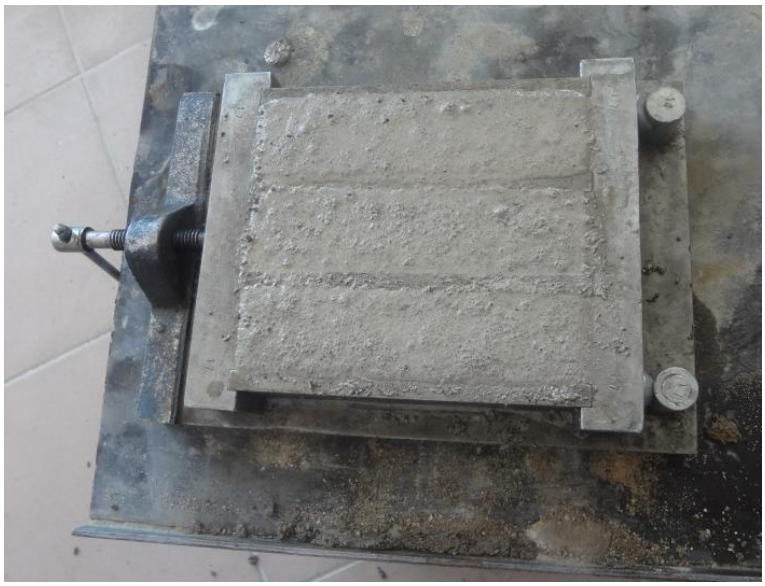
ve atık PET agrega kullanılmıştır. Atık PET agrega, öğütülmemiş cüruf agrega ile %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır.

Karışımlarda kullanılan silikat modülü ($Ms=SiO_2/Na_2O$) 1.00'dir. Sodyum içeriği ise (Na) %4 olarak belirlenmiştir. Karışımların su miktarı ayarlanırken aktivatör içindeki su oranı da dikkate alınmıştır.

Karışımların hazırlanmasına ilk önce aktivatörlerin suyla karıştırılması işlemiyle başlanmıştır. Bağlayıcı ve agregalar, aktivatörler eklenmeden önce bir dakika boyunca kuru olarak karıştırılmış ve daha sonra aktivatör karışımı bu kuru karışıma eklenerek karıştırma işlemi 3 dakika boyunca devam etmiştir (Fotoğraf 3.6).

Fotoğraf 3.6. Harç karışımların hazırlanması

Hazırlanan taze karışımlar 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik kalıplara dökülmüştür (Fotoğraf 3.7).



Fotoğraf 3.7. Kalıba yerleştirilmiş harç karışımı

Taze harç karışımları 24 saat boyunca laboratuvar koşullarında (22±2°C) bırakıldıktan sonra, kalıplardan çıkarılarak %98 bağıl nemli ve 60±0.5°C sıcaklığa sahip nem kabini içine yerleştirilmiştir (Fotoğraf 3.8). Karışımların içerikleri Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

Fotoğraf 3.8. Kür kabinine yerleştirilmiş numuneler

Çizelge 3.5. Karışımların içerikleri

Karışım	YFC (%)	MK (%)	Cüruf agrega (%)	PET agrega(%)	s/b	Aktivatör türü		Ms	Na(%)
YFC-1	100	-	100	-	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC-2	100	-	80	20	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC-3	100	-	60	40	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC-4	100	-	40	60	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC-5	100	-	20	80	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC-6	100	-	-	100	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
						Na_2SiO_3			
YFC10MK-1	90	10	100	-	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC10MK-2	90	10	80	20	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC10MK-3	90	10	60	40	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC10MK-4	90	10	40	60	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC10MK-5	90	10	20	80	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC10MK-6	90	10	-	100	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
						Na_2SiO_3			
YFC20MK-1	80	20	100	-	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC20MK-2	80	20	80	20	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC20MK-3	80	20	60	40	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC20MK-4	80	20	40	60	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC20MK-5	80	20	20	80	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4
YFC20MK-6	80	20	-	100	0.50	Na_2SiO_3	NaOH	1	4

3.3 Numuneler Üzerinde Yürütülen Çalışmalar

Bu bölümde, alkali aktive edilmiş harç numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylere yer verilmiştir.

3.3.1 Birim ağırlık

Numunelerin yaş ve hava kurusu birim ağırlıkları ölçülmüştür. Her bir karışım için üç tartım yapılarak ortalaması alınmıştır.

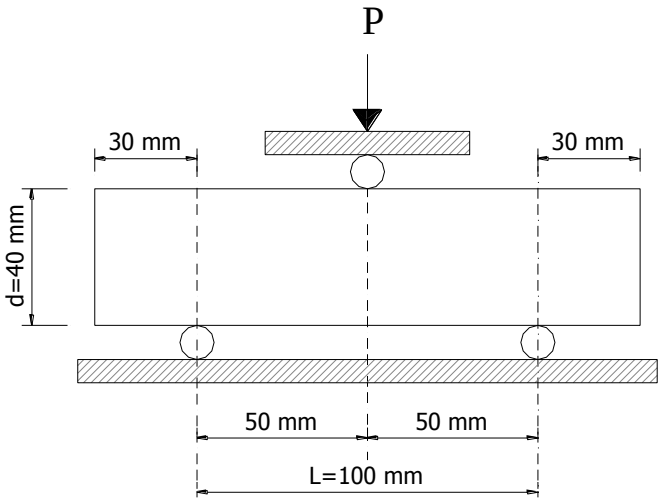
3.3.2 Eğilmede çekme dayanımı

Eğilme deneylerinde kullanılan prizmanın alt kısmı çekme gerilmelerine maruz kaldığı için, eğilme yükü uygulayarak bulunan gerilmeler “eğilmede çekme” dayanımı olarak

ifade edilmektedir (Erdoğan, 2003). 28 gün süre ile kür kabininde kür edilen numuneler, eğilme dayanımlarının tespiti amacıyla Fotoğraf 3.9'da görülen eğilmede çekme deney aletinde teste tabi tutulmuştur. Numunelerin eğilmede çekme dayanımını bulmak için, üç adet prizmatiknumune TS EN 1015-11 (2000)'de belirtildiği gibi üç noktadan yükleme deneyine tabi tutulmuştur.

Fotoğraf 3.9. Eğilmede çekme testi

Eğilmede çekme deney numunesinin boyutları Şekil 3.1'de verilmiştir. Bulunan kırılma yükü eğilmede çekme gerilmesinin hesaplanması için kullanılmıştır. Üç numune için bulunan sonuçların ortalaması alınarak eğilme dayanımı hesaplanmıştır.



Şekil 3.1. Eğilme deneyi

Eğilmede çekme gerilmesi (3.1) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma = 1.5PL/bd^2 \quad (3.1)$$

Burada;

P : Uygulanan kuvvet (kg)

L : Destek silindirleri arasındaki mesafe (mm)

b : Numune kesitinin dar kenar uzunluğu (mm)

d : Numune kesitinin yüksekliği (mm)

σ : Eğilme dayanımı

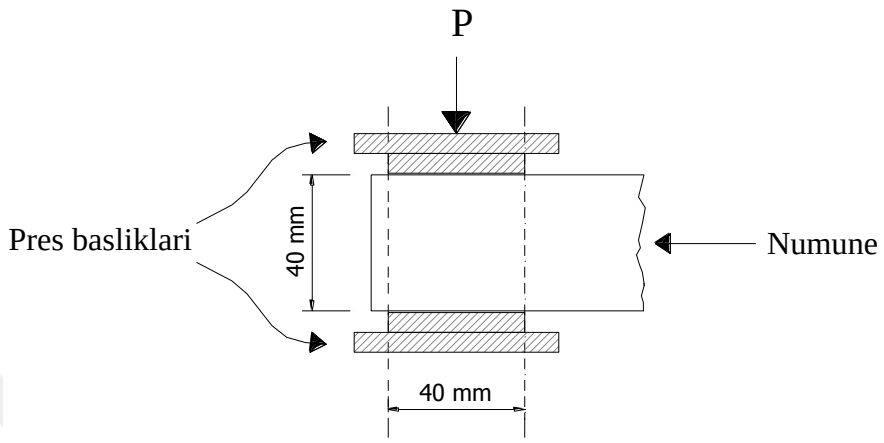
3.3.3 Basınç dayanımı

Numuneler, 3. 7. ve 28. günlerde TS EN 1015-11 (2000)'e uygun olarak tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler, Fotoğraf 3.10'da görülen 200 kN kapasiteli tek eksenli basınç aleti ile yürütülmüştür.

Fotoğraf 3.10. Basınç dayanımı testi

Numunelerin basınç dayanımlarının tespitinde, eğilmede çekme deneyine tabi tutulmuş olan 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlu prizmatik numunelerin yaklaşık olarak ortalarından kırılmalarıyla elde edilen yarım numuneler kullanılmaktadır. Bunun için numune, hazırlanan bir aparatın içine kırık yüzeyi yana gelecek şekilde yerleştirilir. Numunenin alt ve üstündeki 40 mm x 40 mm boyutundaki metal başlıklarla numune

240 kg/sn hızla yüklemeye tabi tutulur. Kırma başlıkları arasındaki prizma 40 mm x 40 mm x 40 mm'lik bir küp görevi görmektedir (Şekil 3.2). Bu şekilde yüklemeyetabitutulan numunelerin basınç değerleri (3.2) eşitliği yardımıyla bulunur ve üç numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak basınç dayanım değeri olarak tespit edilir.



Şekil 3.2. Basınç deneyi

Basınç dayanımı aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmaktadır:

$$\sigma = P/A \tag{3.2}$$

Burada;

σ : Basınç dayanımı

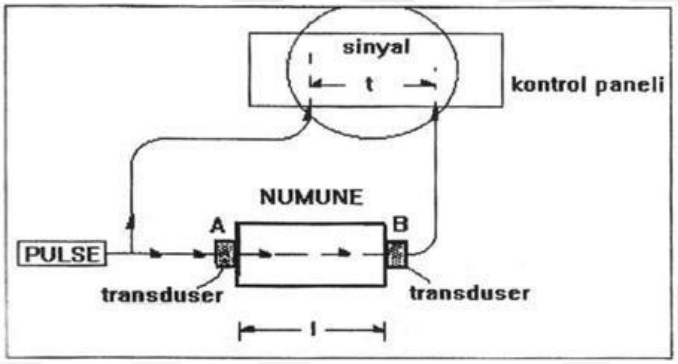
P : Uygulanan kuvvet (N)

A : Kesit alanı (mm^2)

3.3.4 Ultrases geçiş hızı

Numunelerin ultrases geçiş hızı deneyleri ASTM C 597-09 (2010)'a uygun 0,1 µs duyarlıklı ultrases aleti ile gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 3.11). Ses geçiş sürelerinin ölçülmesinde beton yüzeyindeki boşlukları doldurmak amacı ile numunelerin alt ve üst yüzeylerine jel sürülmüştür. 55 kHz'lik ses dalgaları gönderen ve alan iki dönüştürücü Şekil 3.3'te görüldüğü gibi numunenin kısa kenarlarına yerleştirilmiş ve direkt iletim yöntemi uygulanarak ses geçiş süresi (t, µs) okunmuştur. Problar yer değiştirilerek ikinci okuma alınmış, her numune için bu iki okumanın ortalaması alınıp Vs=L/t yararlanarak ses geçiş hızı (Vs, km/s) hesaplanmıştır.

Fotoğraf 3.11. Ultrases geçiş hızının ölçülmesi



Şekil 3.3. Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi

3.3.5 Su emme ve boşluk oranı

Numunelerin 28. gündeki su emme değerleri ve boşluk oranları TS 3624 (1981)'e uygun olarak bulunmuştur. Sertleşmiş numune önce 100ºC sıcaklıktaki ortamda 24 saat bekletilerek kuru duruma getirilmiş ve numunenin bu durumdaki ağırlığı ölçülmüştür (A). Sonra kuru numune, su dolu bir kap içerisinde 24 saat bekletilerek, numunenin doygun yüzey ağırlığı ölçülmüştür (B). Daha sonra, numuneler su içinde 5 saat kaynatılıp soğutulduktan sonra tekrar tartılıp kaynatma metoduna göre su emme miktarları belirlenmiştir (C). Kaynatılıp soğutulan numuneler Arşimet yöntemiyle su içinde tartılmaktadır (D). Numunelerin su emme ve boşluk oranları ile özgül ağırlıkları (3.3), (3.4) ve (3.5) eşitlikleri yardımı ile bulunmaktadır:

$$m_1 = \frac{B - A}{A} \times 100\% \tag{3.3}$$

Burada;

m_1 : Ağırlıkça su emme oranı (%)

A : Etüv kurusu numune ağırlığı (kg)

B : Doygun yüzeyli kuru numune ağırlığı (kg)

$$B_0 = \frac{C - A}{C - D} \times 100\% \tag{3.4}$$

Burada;

B_0 : Görünür boşluk oranı (%)

A : Etüv kurusu numune ağırlığı (kg)

C : Kaynatıp soğutulan numune ağırlığı (kg)

D : Su içindeki numunenin ağırlığı (kg)

$$S_k = \frac{A}{C - D} \tag{3.5}$$

Burada;

S_k . Kuru özgül ağırlık (kg/dm^3)

A : Etüv kurusu numune ağırlığı (kg)

C : Kaynatıp soğutulan numune ağırlığı (kg)

D : Su içindeki numunenin ağırlığı (kg)

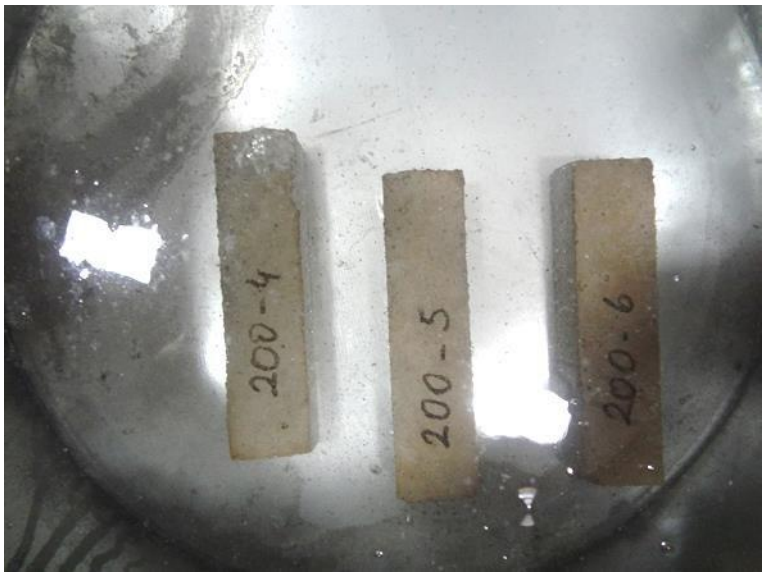
3.4 Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalan Numuneler Üzerinde Yürütülen Çalışmalar

Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu harç numuneler kür kabininde 90 gün süre kür edildikten sonra, 100°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilerek numunelerin içindeki nemin tamamen kaybolması sağlanmıştır. Etüvden çıkarılan numuneler sıcaklık artış hızı 8°C/dk olan bir elektrikli fırına yerleştirilerek 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklıklara kadar ısıtılmışlardır (Fotoğraf 3.12).

Fotoğraf 3.12.Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler

Belirtilen sıcaklık değerinde bir saat süreyle yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler üzerinde iki farklı soğutma yöntemi kullanılmıştır. Numunelerin yarısı, havada yavaş soğutma yöntemi ile soğutulmak üzere laboratuvar ortamına bırakılmıştır (Fotoğraf 3.13). Numunelerin diğer yarısı ise su içinde hızlı soğutma yöntemi ile soğutulmuştur (Fotoğraf 3.14).

Fotoğraf 3.13. Yavaş soğutulan numuneler (havada)



Fotoğraf 3.14. Hızlı soğutulan numuneler (suda)

3.4.1 Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı

Numuneler yüksek sıcaklıklara tabi tutulduktan sonra, yangın sonrası basınç dayanımlarının tespiti amacıyla basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur (TS EN 1015-11 (2000). Elde edilen değerler oda sıcaklığındaki (yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış) numunelerin dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır.

3.4.2 Yüksek sıcaklık sonrası eğilmede çekme dayanımı

Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerleri TS EN 1015-11 (2000)'e uygun olarak bulunmuştur. Bulunan değerler yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış numunelerin dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır.

3.4.3 Yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı değerleri

Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri ASTM C 597-09 (2010)'a uygun olarak ölçülmüş ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

3.4.4 Yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı

Numunelerin yüksek sıcaklık sonrasındaki ağırlıkları ölçülmüş ve ilk ağırlıkları ile karşılaştırılarak numunelerin ağırlık kayıpları tespit edilmiştir.

3.4.5 Yüksek sıcaklık sonrası su emme ve boşluk oranları

Yüksek sıcaklık sonrasında numunelerin su emme boşluk oranları TS 3624 (1981)'e uygun olarak bulunmuştur.

BÖLÜM IV
BULGULAR VE TARTIŞMA

Deney sonuçları iki bölümde incelenmiştir. İlk bölümde atık PET agrega kullanımının alkali aktive edilen yüksek fırın cüruflu ve metakaolinli harç numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İkinci bölümde ise alkali aktive edilen yüksek fırın cüruflu harç numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç ve eğilmede çekme dayanımı değerleri incelenmiştir.

4.1 Atık PET Agregalı Alkali Aktive Edilmiş Harç Numuneler ile İlgili Deney Sonuçları

Bu bölümde, alkali aktive edilmiş YFC'li harçlar ile YFC-MK karışımlı harçlarda atık PET agrega kullanımının numunelerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

4.1.1 Birim ağırlık

Alkali aktive edilmiş numunelerin yaş haldeki birim ağırlıkları ile 28 günlük kuru birim ağırlıkları Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 incelendiğinde, numunelerin yaş birim ağırlıklarının 1260-2390 kg/m^3 değerleri arasında olduğu görülmüştür. Numunelerin kuru birim ağırlıkları ise 1120-2310 kg/m^3 arasındadır. Alkali aktive edilmiş tüm numunelerin kuru birim ağırlıklarının zamanla, serbest suyun buharlaşması sebebiyle azaldığı görülmektedir. YFC-4, YFC-5 ve YFC-6 karışımlarının (sırasıyla %60, %80 ve %100 oranlarında PET agrega içeren) kuru birim ağırlıklarının 1850 kg/m^3 değerinin altında olduğu görülmüştür. Başka bir değişle, bu karışımların birim ağırlık değerleri taşıyıcı hafif betonun birim ağırlık sınırları içindedir (ACI 213R, 1999).

Çizelge 4.1. Numunelerin birim ağırlık değerleri

Karışım	PET oranı (%)	Birim ağırlık (kg/m^3)	
		Yaş	Kuru
YFC-1	0	2390	2310
YFC-2	20	2160	2110
YFC-3	40	1940	1930
YFC-4	60	1710	1630
YFC-5	80	1510	1490
YFC-6	100	1340	1300
YFC10MK-1	0	2330	2110
YFC10MK-2	20	2090	1920
YFC10MK-3	40	1840	1740
YFC10MK-4	60	1760	1560
YFC10MK-5	80	1600	1420
YFC10MK-6	100	1300	1170
YFC20MK-1	0	2210	2070
YFC20MK-2	20	2080	1900
YFC20MK-3	40	1920	1670
YFC20MK-4	60	1730	1520
YFC20MK-5	80	1380	1210
YFC20MK-6	100	1260	1120

Çalışmada kullanılan MK'nin yoğunluğu YFC'den düşük olduğundan dolayı, MK katkılı karışımların birim ağırlık değerleri YFC içeren numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Alkali aktive edilmiş harçların yaş ve kuru birim ağırlıkları artan PET agrega miktarına bağlı olarak da azalmıştır. Bu azalma, PET agreganın özgül ağırlığının (1.27 g/cm^3) öğütülmemiş cüruf agregadan düşük (2.49 g/cm^3) olmasından kaynaklanmıştır.

4.1.2 Basınç dayanımı

Alkali aktive edilmiş harçların basınç dayanım değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Agrega olarak sadece öğütülmemiş cüruf agrega içeren YFC-1 karışımının 28 günlük basınç dayanımı 70 MPa bulunuştur. Bu değer hiç doğal agrega içermeyen bir harç numunesi için oldukça tatminkâr bir seviyedir. Collins ve Sanjayan (1998), bağlayıcı olarak %100 oranında YFC'nin kullanıldığı alkali aktive edilmiş karışımların bir günlük basınç dayanımlarının NPÇ'li betonların bir günlük basınç dayanımlarına eşit çıktığını belirtmişlerdir. Wu vd. (1990), alkali aktive edilmiş YFC'li harçların 28 ve 90 günlük dayanımlarının PÇ'li betonlardan daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 4.2. Numunelerin basınç dayanım değerleri

Karışım	PET oranı (%)	Basınç dayanımı (MPa)		
		3 gün	7 gün	28 gün
YFC-1	0	53.9	66.9	70.0
YFC-2	20	31.8	35.4	41.0
YFC-3	40	29.6	33.7	34.9
YFC-4	60	18.8	20.0	22.6
YFC-5	80	16.3	16.9	17.2
YFC-6	100	12.0	12.8	13.0
YFC10MK-1	0	7.3	10.9	11.6
YFC10MK-2	20	6.6	7.6	9.3
YFC10MK-3	40	3.4	5.5	7.5
YFC10MK-4	60	3.3	4.9	5.2
YFC10MK-5	80	1.4	1.6	2.3
YFC10MK-6	100	1.2	1.7	2.2
YFC20MK-1	0	3.7	5.1	5.9
YFC20MK-2	20	3.3	4.6	5.0
YFC20MK-3	40	3.1	3.3	3.4
YFC20MK-4	60	2.3	2.4	2.9
YFC20MK-5	80	1.9	2.2	2.5
YFC20MK-6	100	1.7	1.7	1.8

Çizelge 4.2'den görüleceği üzere, karışımlardaki atık PET agrega miktarı arttıkça, basınç dayanım değerleri düşmüştür. 28 günlük basınç dayanım değerleri incelendiğinde, YFC-2, YFC-3, YFC-4, YFC-5 ve YFC-6 karışımlarının basınç dayanım değerleri kontrol karışımının (YFC-1) basınç dayanım değerinin sırasıyla %58.6, %49.9, %32.3, %24.6 ve %18.6'sı oranlarında olduğu görülmektedir. Basınç dayanımlarında gözlenen bu azalmaların; atık PET agrega ile bağlayıcı hamuru arasındaki bağlantının cüruf agrega ile hamur arasındaki bağlantı kadar güçlü olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde de PET agreganın çimento hamuru ile aderansının doğal agregalara oranla daha zayıf olduğunu belirten çalışmalar bulunmaktadır (Akçaözoğlu vd., 2013; Akçaözoğlu ve Atiş, 2011; Frigione, 2010, Gavela vd., 2004).

Aguilar vd. (2010), cüruf agreganın pürüzlü yüzeye sahip olması ve reaksiyonlara katkıda bulunması sebebiyle, bağlayıcı hamuru ile yoğun ve güçlü bir arayüzey oluşturduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca literatürde, cüruf agreganın boşluklu yapısının karışımdaki suyu bünyesine çekerek daha sonraki yüksek fırın cürufu reaksiyonlarında

kullanılmasını sağladığı ve bu durumun dayanımın artmasına katkı sağladığı belirtilmektedir (Escalante-Garcia vd., 2009).

Karışımda PET agrega miktarı arttıkça işlenebilirlik zorlaşmış ve bu durum numunelerin daha boşluklu bir yapıya sahip olmalarına neden olmuştur. Bu sebeple, alkali aktive edilmiş harçlarda atık PET agrega miktarı arttıkça, numunelerin basınç dayanımlarında düşme gözlenmiştir. Benzer sonuçlar atık PET agrega içeren çimento bağlayıcılı harçlarla ilgili literatürde de görülmektedir (Akçaözoğlu vd., 2013).

Araştırma kapsamında üretilen YFC bağlayıcılı numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri genel olarak taşıyıcı hafif beton sınır değeri olan 17 MPa'nın üzerinde çıkmıştır (ACI 213R, 1999). Ancak YFC-1, YFC-2 ve YFC-3 karışımlarının birim ağırlık değerleri 1850 kg/m^3'ün üzerinde olduğu için; sadece YFC-4 ve YFC-5 karışımları (%60 ve %80 oranlarında PET agrega içeren) taşıyıcı hafif beton sınıfına girmektedir. %100 oranında PET agrega içeren YFC-6 karışımının basınç dayanım değeri ise belirtilen sınırın altında çıkmıştır.

Alkali aktive edilmiş numunelerin basınç dayanımları 7. güne kadar hızla artmış, 7. günden sonra ise numunelerin dayanım kazanma hızları azalmıştır. Bu durum PÇ tabanlı betonların dayanım gelişiminden farklıdır. Literatürde de belirtildiği gibi, AA-YFC bağlayıcılı betonlar erken yaşlarda yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşırlar (Bernal vd., 2011b; Bernal vd., 2012; Altan ve Erdoğan, 2012; Chi, 2012; Bakharev vd., 1999b; Collins ve Sanjayan, 1998; Al-Otaibi, 2008; Wu vd., 1990; Shi vd., 2011). Bu erken dayanımın sebebi yüksek alkali aktivatör içeriğidir. Ayrıca AA-YFC bağlayıcılı betonların nihai dayanımları, PÇ betonlarına göre daha yüksektir. Çizelge 4'ten görüleceği üzere, alkali aktive edilen harçların 7 günlük basınç dayanım değerleri, 28 günlük basınç dayanım değerlerinin %74'ü ve üzerinde çıkmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada üretilen alkali aktive edilmiş harçların erken dayanımlarının yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum cüruf agrega ve PET agrega içeren bütün karışımlarda benzerdir.

Çalışma kapsamında üretilen AA-YFC karışımları 60±0.5°C kür koşullarında tatminkâr basınç dayanım değerleri göstermiştir. Ancak AA-YFC-MK karışımları ise aynı kür koşulları altında AA-YFC karışımlarına göre daha düşük dayanımlar sergilemişlerdir.

Karışımdaki cüruf içeriği azaldıkça, alkali aktive edilen harçların basınç dayanım değerleri de azalmaktadır (Wang vd., 2012). Karışımlarda kullanılan aktivatör dozajı, literatürde metakaolinin alkali aktivasyonu için kullanılan dozajdan daha düşük olduğu için; MK'nin reaksiyonları tamamlanamamış ve bu durumda karışımda MK içeriği arttıkça basınç dayanımında ciddi azalmalar görülmüştür (Bernal vd., 2012). Ayrıca MK ilavesi karışımların işlenebilirliğini zorlaştırmış ve karışımlar daha gözenekli bir yapıya sahip olmuştur. Bu durum, MK ilaveli karışımların basınç dayanım değerlerinin düşük çıkmasının diğer bir sebebidir.

Düşük basınç dayanımının bir başka sebebi ise kür koşullarının olumsuz etkisidir. Bu araştırmada, üretilen taze karışımlar kalıplara konmuş ve 24 saat süreyle 22±2°C ortam sıcaklığındaki laboratuvar koşullarında bırakılmıştır. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler %98 bağıl nemli ve 60±0.5°C sıcaklıktaki kür kabininde kür edilmişlerdir. Bu kür koşullarında YFC karışımları oldukça iyi dayanımlar sergilerken, MK katkılı karışımların dayanım değerleri YFC karışımlarına göre düşük çıkmıştır. Literatürde, alkali aktive edilmiş MK bazlı sistemlerde yüksek dayanımlara ulaşmak için yüksek kür sıcaklığı ve yüksek aktivatör dozajına gereksinim duyulduğu belirtilmiştir (Krivenko, 1997).

Alkali aktive edilmiş YFC-MK bazlı karışımlarda da kür şartlarının çok önemli olduğu ve standart kür şartları altında kür edilen alkali aktive edilmiş YFC-MK karışımlarının en düşük dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir (Yunsheng vd., 2007). Aguilar vd. (2014), alkali aktive edilmiş MK'li karışımların 75°C'de 24 saat kür edilmesiyle, bir günlük basınç dayanım gelişimlerinin oldukça hızlı olduğunu, ancak aynı karışımların 20°C'de kür edilmesi durumunda dayanımda ciddi bir artışın olmadığını belirtmişlerdir. Rashad (2013), alkali aktive edilmiş MK'li karışımlar için optimum kür sıcaklığının 60°C civarında olduğu belirtilmesine rağmen, MK'nin inceliği, aktivatör tipi ve dozajının da dayanımı etkileyen diğer faktörler olduğunu bildirmiştir.

Bu sonuçlardan yola çıkarak, çalışma kapsamında üretilen alkali aktive edilmiş YFC-MK'li karışımların kalıplara döküldükten hemen sonra yüksek sıcaklıkta kür edilmesi durumunda daha yüksek dayanımlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca bu karışımların dayanımlarını artırmak için daha yüksek dozajda aktivatör kullanılmasının da yararlı olabileceği kanısına varılmıştır.

4.1.3 Eğilmede çekme dayanımı

Alkali aktive edilen harç numunelerin 28 günlük eğilmede çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerleri

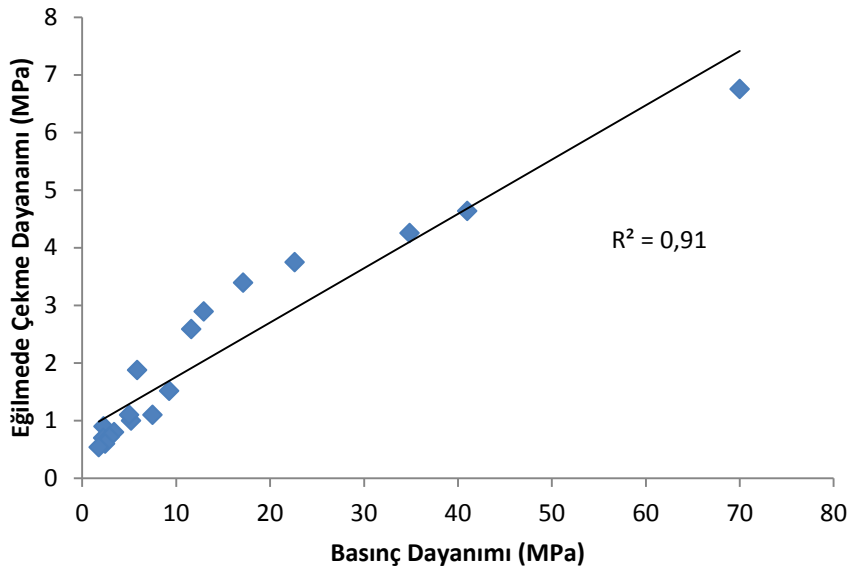
Karışım	PET oranı (%)	Eğilme dayanımı (MPa)
YFC-1	0	6.7
YFC-2	20	4.6
YFC-3	40	4.3
YFC-4	60	3.7
YFC-5	80	3.4
YFC-6	100	2.9
YFC10MK-1	0	2.6
YFC10MK-2	20	1.5
YFC10MK-3	40	1.1
YFC10MK-4	60	1.0
YFC10MK-5	80	0.9
YFC10MK-6	100	0.7
YFC20MK-1	0	1.9
YFC20MK-2	20	1.1
YFC20MK-3	40	0.8
YFC20MK-4	60	0.7
YFC20MK-5	80	0.6
YFC20MK-6	100	0.5

Çizelge 4.3 incelendiğinde, numunelerin eğilme dayanımlarının artan PET agrega miktarına bağlı olarak düştüğü görülmüştür. Ayrıca YFC-MK karışımlarının eğilme değerleri sadece YFC içeren karışımlara göre düşük çıkmıştır. Bu sonuçlar basınç dayanım sonuçlarıyla paralellik göstermektedir.

4.1.4 Basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı ilişkisi

Çalışma kapsamında üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanımları ile eğilmede çekme dayanımları arasındaki ilişki Şekil 4.1'de sunulmuştur. Bu ilişkinin korelasyon katsayısı 0.91 olarak bulunmuştur. Bu sonuçtan yola çıkarak, alkali aktive edilmiş PET agregalı harçların basınç dayanımları ile eğilme dayanımları arasında doğrusal bir ilişki

olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.1. Numunelerin basınç dayanımları ile eğilmede çekme dayanımları arasındaki ilişki

4.1.5 Ultrases geçiş hızı

Alkali aktive edilen harç numunelerin 28 günlük ultrases geçiş hızı değerleri Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

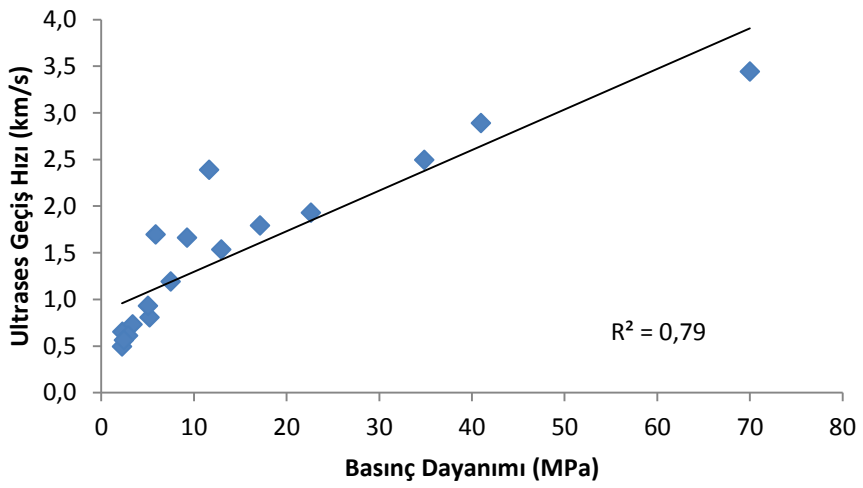
Çizelge 4.4'ten görüleceği üzere, karışımlarda PET agrega miktarı arttıkça, numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. Bu duruma benzer olarak, karışımlarda artan MK miktarı da ultrases geçiş hızında azalmaya sebep olmuştur. Bu durumun, numunelerin birim ağırlıklarının azalmasından ve boşluk yapılarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü bir malzeme içindeki ultrases dalgası yayılma hızı o malzemenin porozitesine, dolayısıyla yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır. Betonun yoğunluğu azaldıkça, ultrases geçiş hızı ve dayanımı da azalmaktadır (Whitehurst, 1951; Zoldners, 1971).

Çizelge 4.4. Numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri

Karışım	PET oranı (%)	Ultrases geçiş hızı (km/s)
YFC-1	0	3.32
YFC-2	20	3.12
YFC-3	40	2.74
YFC-4	60	2.16
YFC-5	80	1.88
YFC-6	100	1.53
YFC10MK-1	0	2.48
YFC10MK-2	20	1.68
YFC10MK-3	40	1.19
YFC10MK-4	60	1.00
YFC10MK-5	80	0.65
YFC10MK-6	100	0.49
YFC20MK-1	0	2.05
YFC20MK-2	20	1.11
YFC20MK-3	40	0.73
YFC20MK-4	60	0.61
YFC20MK-5	80	0.56
YFC20MK-6	100	-

4.1.6 Basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi

Numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki ayrıca incelenmiş ve Şekil 4.2'de sunulmuştur.

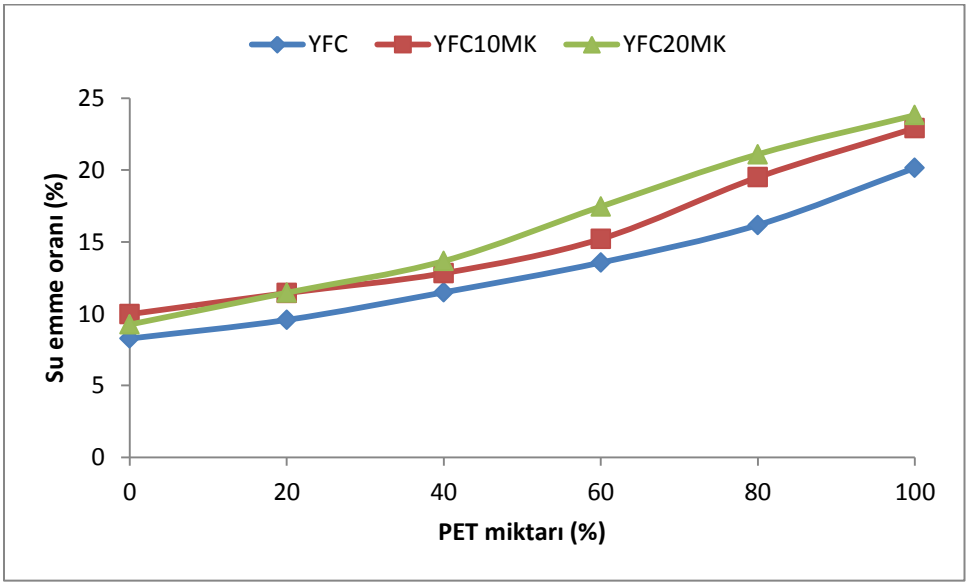


Şekil 4.2. Numunelerin basınç dayanım değerleri ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

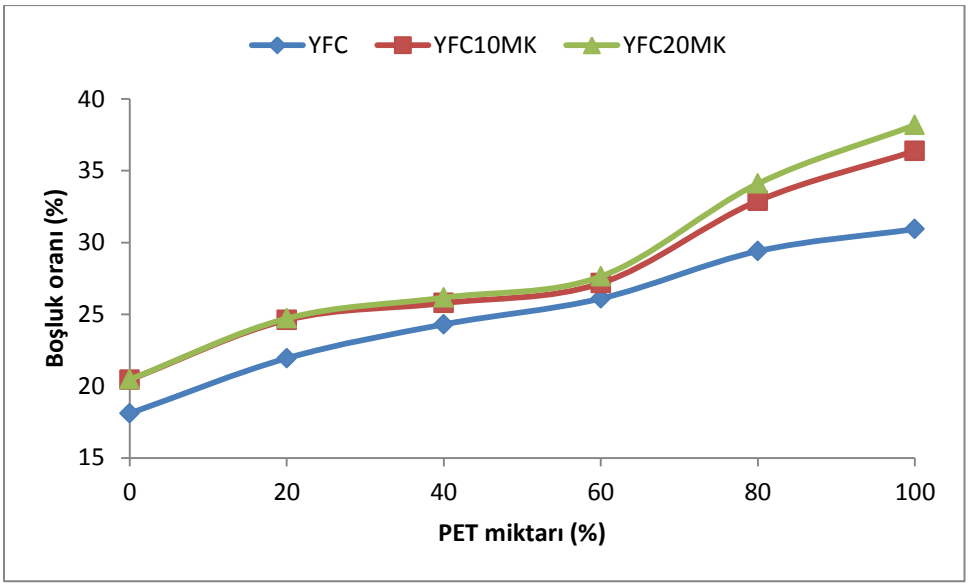
Şekil 4.2'den görüleceği üzere, kurulan ilişkinin korelasyon katsayısı 0.79 olarak bulunmuştur. Karışımlarda PET agrega miktarı arttıkça işlenebilirlik zorlaşmış ve numuneler daha boşluklu bir yapıya sahip olmuştur. Bu durum hem basınç dayanımında, hem de ultrases geçiş hızlarında düşmeye sebep olmuştur. Numunelerin basınç dayanım değerleri azaldıkça, ultrases geçiş hızı değerlerinin de azaldığı görülmektedir. Demirboğa vd. (2004), ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasında kuvvetli bir ilişkinin olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuçlardan yola çıkarak, alkali aktive edilmiş PET agregalı harçların basınç dayanımlarını tahmin etmek amacıyla tahribatsız bir yöntem olan ultrases geçiş hızı ölçme yönteminin de kullanılma potansiyelinin olduğu düşünülmektedir.

4.1.7 Su emme ve boşluk oranları

Alkali aktive edilen PET agregalı harçların 28 günde ölçülen su emme ve boşluk oranları Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sunulmuştur. Sadece cüruf agrega içeren YFC-1 karışımının su emme oranı %8.3 olarak bulunmuştur. Bu oran, karışımda artan PET agrega miktarına bağlı olarak artmış ve %100 oranında PET agrega içeren YFC-6 karışımında %20.2 seviyesine çıkmıştır. Ayrıca artan PET agrega miktarı numunelerin boşluk oranlarında da artışa neden olmuştur. YFC-1 karışımının boşluk oranı %18.1 iken YFC-6 karışımının boşluk oranı %30.9 olmuştur.



Şekil 4.3. Numunelerin su emme oranları



Şekil 4.4. Numunelerin boşluk oranları

YFC-MK karışımlarının su emme ve boşluk oranları ise YFC karışımlarından yüksek çıkmıştır. Metakaolinin işlenebilirliği zorlaştırması, numunelerin boşluk yapısının artmasına ve su emme oranlarının yüksek olmasına sebep olmuştur. Bununla beraber, çalışma kapsamında üretilen alkali aktive edilmiş PET agregalı numunelerin tamamının su emme oranları hafif betonun su emme sınırlarının altında çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar yapılan bir başka çalışmanın (Topçu, 2006) sonuçları ile de uyum içerisindedir.

4.2 Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalan Alkali Aktive Edilmiş YFC'li Numuneler ile İlgili Deney Sonuçları

Bu bölümde, alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu harç numunelerin yüksek sıcaklık karşısında davranışı incelenmiştir.

4.2.1 Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı

60°C sıcaklıkta, %98 bağıl nemli kür kabininde 90 gün süreyle kür edilen AA-YFC'li harç numuneler 1 saat süreyle 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır (Fotoğraf 4.1). Numuneler fırından çıkarıldıktan sonra yavaş (havada) ve hızlı (suda) olmak üzere iki farklı yöntemle soğutulmuştur (Fotoğraf 4.2).

Fotoğraf 4.1. Numunelerin yüksek sıcaklık öncesindeki görünüşleri

Fotoğraf 4.2. Numunelerin fırından çıkarılması

Numuneler soğutulduktan sonra basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Numunelerin basınç dayanım değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Her bir sıcaklıkta ölçülen basınç dayanım değerinin, oda sıcaklığında ölçülen basınç dayanım değerine göre oranları da aynı çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.5. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları

Sıcaklık	Havada soğutulan		Suda soğutulan	
	Basınç dayanımı (MPa)	Dayanım kaybı (%)	Basınç dayanımı (MPa)	Dayanım kaybı (%)
22°C	77.42	-	77.42	-
200°C	60.34	22	54.94	29
400°C	42.83	45	40.14	48
600°C	30.47	61	28.54	63
800°C	14.75	81	13.89	82
1000°C	26.45	66	23.80	69

Çizelge 4.5 incelendiğinde, oda sıcaklığında numunenin (22°C) 90 günlük basınç dayanım değerinin 77.42 MPa olduğu görülmektedir. Yüksek fırın cürufunun kendi başına çok az veya hiç bağlayıcılık özelliği göstermemesine rağmen, alkali aktivatörlerle aktive edildiğinde oldukça yüksek dayanım gösterdiği literatürde belirtilmektedir (Krizan ve Zivanovic, 2002). Ayrıca karışımda agrega olarak kullanılan

öğütülmemiş cürufun çimento hamuru ile yoğun ve güçlü bir bağ kurmasının da dayanıma olumlu katkısının olduğu düşünülmektedir (Aguilar vd., 2010).

Araştırma kapsamında, sıcaklık 800°C'ye kadar arttıkça, hem yavaş hem de hızlı soğutulan numunelerin basınç dayanımlarında düşme gözlenmiştir (Çizelge 4.5). Yüksek sıcaklığa maruz kalan ve havada soğutulan numunelerin basınç dayanım değerlerinde meydana gelen kayıp miktarı, şahit numuneye göre, 200°C sıcaklıkta %22 iken, 800°C sıcaklıkta bu değer %81'e kadar yükselmiştir. Artan yüksek sıcaklık numunelerin boşluk yapısında artışa neden olmakta ve yapısındaki suyun buharlaşması nedeniyle numunelerin ağırlıklarında azalmalar ve ilave boşluklu yapılar meydana gelmektedir (Demirel ve Keleştemur, 2010; Topçu ve Demir, 2007). Yüksek sıcaklık sonrası boşluk yapısının genişlemesi betonun dayanımında kayıplara sebep olmaktadır (Khoury,1992; Chan vd.,2000).

Suda hızlı soğutulan numunelerin dayanım kaybı, havada soğutulan numunelere göre daha fazladır. Bu durumun, hızlı soğutma yönteminde numunenin iç sıcaklığının ani olarak değişmesi sonucu meydana gelen çatlakların dayanım kaybına yol açmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Wang vd., 2014; Bilim, 2011).

Normal betonlarda, 300°C sıcaklıktan itibaren mikro çatlaklar görülmeye başlamakta ve basınç dayanımlarında belirgin düşüşler görülmektedir (Hertz, 2005; Demirel ve Keleştemur, 2010). 550°C civarında agregalarda bozulmalar gözlenir (Georgali ve Tsakiridis, 2005). 600°C sıcaklıkta ise C-S-H jeli ayrışmaya başlar ve 800°C sıcaklıktan sonra betonda parçalanmalar görülür. 1150°C'nin üzerinde ise çimento hamuru camsı yapıya dönüşmektedir. Bu olayların sonucunda betonun yapısında değişiklikler ve ciddi dayanım kayıpları meydana gelir (Hertz, 2005; Al-Sibahy and Edwards, 2012).

AA-YFC betonlarında ise, kuruma rötresi sebebi ile önceden mevcut olan çok sayıda mikro çatlaklar sıcaklık arttıkça artmaya devam eder, 600-800°C'de oldukça belirgin hale gelir. AA-YFC hamurundaki toplam boşluk miktarı bağlayıcı hamurunun rötresinin artması ve bozunması sebebiyle artar. Bu durum basınç dayanımında ciddi kayıplara neden olur (Rovnanik vd., 2013). Bu çalışma kapsamında üretilen numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görünüşleri Fotoğraf 4.3'te verilmiştir.

Fotoğraf 4.3. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin görünüşleri (soldan sağa, 22, 200, 400, 600, 800 ve 1000°C)

Fotoğraf 4.3 incelendiğinde, numunelerin tamamının yüksek sıcaklıklar sonrası dağılma göstermediği, şekillerini koruduğu, yalnızca 800°C'ye maruz kalan numunelerde küçük çatlamaların meydana geldiği görülmektedir (Fotoğraf 4.4).

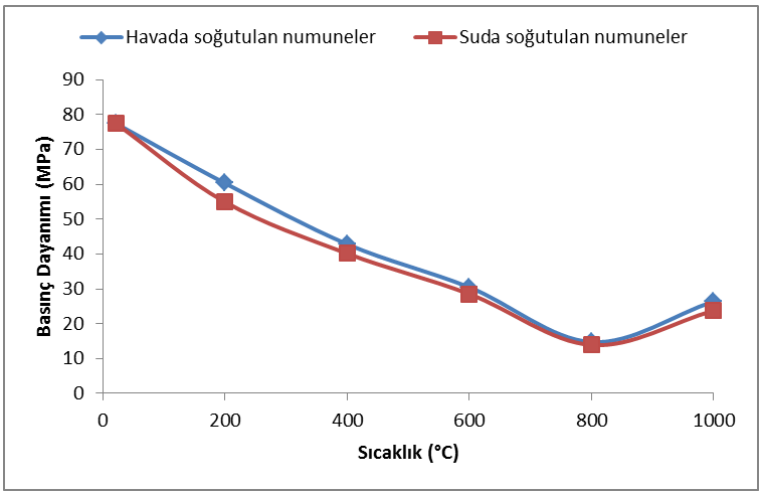
Fotoğraf 4.4. 800°C sıcaklığa maruz kalan numunelerin soğutulduktan sonraki görünüşleri

Fotoğraf 4.5.'te ise normal bir beton numunesinin yüksek sıcaklık sonrasındaki görünüşleri görülmektedir.

Fotoğraf 4.5. PÇ'li numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görünüşleri (800°C ve 1000°C) (Akçaözoğlu ve Akçaözoğlu, 2012).

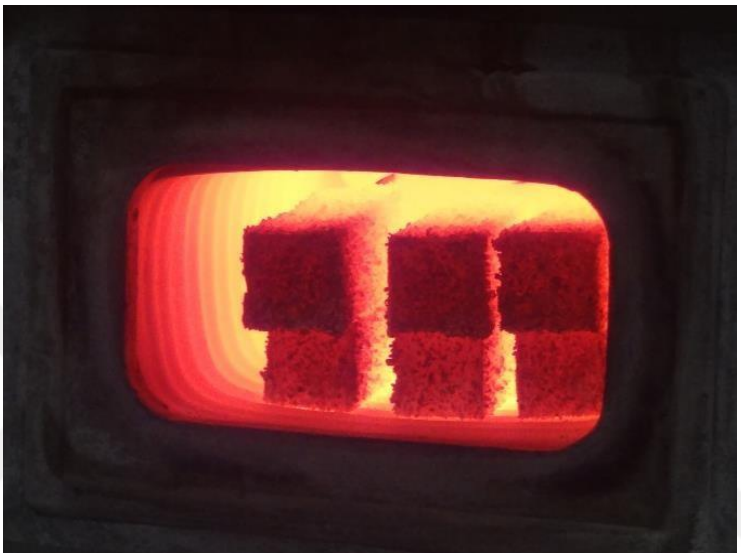
Alkali aktivatörlü beton ve harçların yüksek sıcaklık karşısındaki davranışlarının PÇ'li betonlara benzer veya daha iyi olduğu literatürde belirtilmektedir (Murri vd., 2013; Guerrieri ve Sanjayan, 2010; Bakharev vd., 1999; Escalante-Garcia vd., 2009). Bu çalışmada da AA-YFC bağlayıcılı harçların yüksek sıcaklıklar karşısında basınç dayanımlarında düşme görülmesine rağmen, yapısal bütünlüklerini korudukları gözlenmiştir.

1000°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımlarının ise gözlenen eğilimin tersine; 800°C sıcaklıktaki numunelerin basınç dayanımlarından yüksek çıktığı görülmektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları

1000°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin dış görünüşü de diğer numunelerden farklı olmuştur (Fotoğraf 4.6). Bu numunelerin dış yüzeylerinde küçük boyutlu tanecikler oluşmuştur (Fotoğraf 4.7). Sözü edilen numunelerin basınç dayanımlarının beklenenin aksine tekrar artma eğilimi göstermesi, 1000°C sıcaklık etkisiyle numunenin içyapısında bir değişmenin olduğu sonucunu işaret etmektedir. 1000°C sıcaklıkta dağılmayan ve dayanımı artan bu numunelerin içindeki boşluk yapısının azalarak seramik bir bağın oluştuğu düşünülmektedir.



Fotoğraf 4.6. 1000°C sıcaklıkta numunelerin görünüşü

Fotoğraf 4.7. 1000°C sıcaklığa maruz kalan numunenin soğutulduktan sonraki görünüşü

Rovnanik vd. (2013), 1200°C gibi yüksek sıcaklıklarda, AA-YFC betonunun içinde, yaklaşık 5 µm boyutunda camsı yapıda prizmatik kristal kümelerden oluşan yeni reaksiyon ürünlerinin ortaya çıktığını bildirmişlerdir. Bu kristallerin daha çok kalsiyum magnezyum silikatlardan (akermanit) oluştuğu belirtilmektedir.

4.2.2 Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı

AA-YFC bağlayıcılı harç numuneler 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra numunelerin eğilme dayanımları ölçülerek Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları

Sıcaklık	Havada soğutulan		Suda soğutulan	
	Eğilme dayanımı (MPa)	Dayanım kaybı (%)	Eğilme dayanımı (MPa)	Dayanım kaybı (%)
22°C	2.35	-	2.35	-
200°C	2.19	6	2.04	13
400°C	1.52	35	1.47	37
600°C	1.10	53	1.07	54
800°C	0.71	70	0.65	72
1000°C	1.23	48	1.20	49

Çizelge 4.6 incelendiğinde, oda sıcaklığında 2.35 MPa olan eğilme dayanımı değerinin, basınç dayanım değerlerine benzer şekilde artan sıcaklığa bağlı olarak düştüğü görülmektedir. 1000°C sıcaklıkta, basınç dayanımında gözlenen sonuç, eğilme dayanımlarında da benzer şekilde görülmüştür. 200°C sıcaklıktan itibaren artan sıcaklığa bağlı olarak azalan eğilme dayanımları, 1000°C sıcaklıkta tekrar artma eğilimi göstermiştir. Suda hızlı soğutulan numunelerin dayanım kaybı, yavaş soğutulan numunelere göre daha fazladır.

4.2.3 Yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı değerleri

Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı değerleri Çizelge 4.7'de sunulmuştur.

Çizelge 4.7 incelendiğinde, numunelerin ultrases geçiş hızı değerlerinin basınç ve eğilme dayanımlarına benzer olarak artan sıcaklığa bağlı olarak düştüğü görülmektedir. Artan yüksek sıcaklık numunelerin boşluk yapısında artışa neden olmuş ve yapısından suyun buharlaşması nedeniyle numunelerin ağırlıklarında azalmalar ve ilave boşluklu yapılar meydana gelmiştir. Bu durum ultrases geçiş hızlarında da düşmeye neden

olmuştur (Demirel ve Keleştemur, 2010; Topçu ve Demir, 2007; Wang vd.,2014).

Çizelge 4.7. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı değerleri

Sıcaklık	Havada soğutulan		Suda soğutulan	
	Ultrases geçiş hızı (km/sn)	Değer kaybı (%)	Ultrases geçiş hızı (km/sn)	Değer kaybı (%)
22°C	3.00	-	3.00	-
200°C	2.95	2	2.86	5
400°C	2.41	20	2.24	25
600°C	2.18	27	1.99	34
800°C	2.00	33	1.89	37
1000°C	2.22	26	0.73	76

Su içerisinde hızlı soğutulan numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri havada soğutulan numunelerden daha düşük çıkmıştır. Bu durum basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına benzerdir.

4.2.4 Yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı

Yüksek sıcaklık etkisiyle beton numunelerin içyapısındaki suların buharlaşması ve yapısal bütünlüğünün bozulması ağırlık kayıplarına yol açmaktadır (Demirel ve Keleştemur, 2010; Andıç-Çakır ve Hızal, 2012). Numunelerin ağırlık kayıpları Çizelge 4.8'de sunulmuştur.

Çizelge 4.8. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kayıpları

Sıcaklık	Havada soğutulan (%)	Suda soğutulan (%)
22°C	-	-
200°C	2.79	2.31
400°C	7.78	3.93
600°C	8.31	7.08
800°C	9.07	9.19
1000°C	9.24	9.67

Çizelge 4.8 incelendiğinde, basınç dayanım değerlerine benzer şekilde, artan sıcaklıklara bağlı olarak numunelerin ağırlıklarının azaldığı görülmektedir. 200°C'de numunelerin ağırlık kayıpları %2 civarında iken, 1000°C'de ağırlık kayıpları %10

seviyesine yakındır. Suda hızlı soğutulan numunelerin bazılarının ağırlık kayıpları yavaş soğutulanlardan daha az çıkmıştır. Bu durumun, suda soğutma sırasında az miktarda suyun numune içerisinde kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.2.5 Yüksek sıcaklık sonrası su emme ve boşluk oranları

Boşluk yapısı bağlayıcı hamurunun dayanımını etkilediğinden dolayı betonun genel dayanımı açısından önem taşımaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık sonrası boşluk yapısının genişlemesi betonun dayanımında kayıplara sebep olmaktadır (Khoury, 1992; Chan vd., 2000). Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin su emme ve boşluk oranları Çizelge 4.9'da sunulmuştur.

Çizelge 4.9. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası su emme ve boşluk oranları

Sıcaklık	Havada soğutulan		Suda soğutulan	
	Su Emme Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)	Su Emme Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)
22°C	3.9	9.9	3.9	9.9
200°C	6.4	13.9	6.6	15.4
400°C	7.8	21.3	8.1	23.3
600°C	9.3	24.1	9.6	24.7
800°C	9.5	25.1	10.0	25.4
1000°C	10.5	26.0	11.9	28.0

Çizelge 4.9'dan görüldüğü üzere, numunelerin su emme ve boşluk oranları artan sıcaklık değerlerine bağlı olarak artmıştır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle hidratasyon ürünlerinin bozulmasına bağlı olarak numunelerin boşluk oranları da artmıştır. Genel olarak havada ve suda soğutulan numunelerin su emme ve boşluk değerleri birbirine yakındır, ancak bu oranlar suda soğutulan numunelerde bir miktar fazladır.

BÖLÜM V
SONUÇLAR

- Çalışma kapsamında üretilen alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu numunelerin tamamı erken yaşlarda yüksek dayanımlara ulaşmıştır. %60 ve %80 oranlarında PET agrega içeren AA-YFC bağlayıcılı numuneler birim ağırlık ve basınç dayanım değerleri açısından taşıyıcı hafif beton sınıfına girmektedir. Taşıyıcı hafif beton üretimi amacıyla, alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu harçlarda atık PET agreganın öğütülmemiş cüruf agrega ile%80 oranına kadar yer değiştirilerek kullanılması mümkündür. Bununla beraber, alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu-metakaolin (AA-YFC-MK) karışımlarının basınç dayanım değerleri taşıyıcı hafif beton sınırlarının altında kalmıştır.

- Karışımlarda atık PET agrega miktarı arttıkça, numunelerin birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. Ayrıca PET agrega ilavesi karışımların işlenebirliğini azaltarak numunelerin boşluk yapısının ve su emme oranlarının artmasına neden olmuştur.

- Numunelerin basınç dayanım değerleri ile eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızları değerleri arasında doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Ultrases geçiş hızı yönteminin, numunelerin basınç dayanımlarını tahmin etmek amacıyla kullanılma potansiyelinin olduğu düşünülmektedir.

- Alkali aktive edilen yüksek fırın cüruflu (AA-YFC) harç numunelerin yüksek sıcaklıklar karşısında dayanımlarının düşmesine rağmen; numunelerin tamamının yüksek sıcaklıklar sonrası şekillerini koruduğu, dağılma göstermediği; yalnızca 800°C'ye maruz kalan numunelerde küçük çatlakların meydana geldiği görülmüştür.

- 1000°C sıcaklığa maruz bırakılan AA-YFC'li numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ise gözlenen eğilimin tersine; 800°C sıcaklıktaki numunelerin dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır. Buradan, 1000°C sıcaklıkta numunelerin içyapılarında bir değişmenin meydana geldiği ve dolayısıyla, dağılma belirtisi

görülmeyen bu numunelerde, yüksek sıcaklığın etkisi ile yeni reaksiyon ürünlerinin oluştuğu düşünülmektedir.

- Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, alkali aktive edilmiş atık PET agregalı ve YFC'li harçların, geri dönüşümlü yapı malzemeleri konusunda yeni bir alternatif olabileceği kanısına varılmıştır. Beton üretiminde agrega ve bağlayıcı olarak tamamen atık malzemelerin kullanılması; doğal kaynakların korunması, atıkların geri dönüşümde değerlendirilmesi, çevre kirliliğinin önlenmesi ve enerji tasarrufunun sağlanması gibi açılardan avantajlar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Abdul Razak, H. and Wong, H.S., "Strength estimation model for high-strength concrete incorporating metakaolin and silica fume", ***Cement and Concrete Research*** 35, 688- 695, 2005.

Abrams, M.S., "Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600 °F," ***American Concrete Institute*** SP 25, Michigan, 1971.

ACI Committee 213R., Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, ***American Concrete Institute***, Michigan, 1999.

Aguilar, R.A., Diaz, O.B. and Escalante-Garcia, J.I., "Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates", ***Construction and Building Materials*** 24, 1166-1175, 2010.

Aguilar, R.A., Diaz, O.B., Gorokhovsky, A. and Escalante-Garcia, J.I., "Geopolymer mortars based on a low grade metakaolin: Effects of the chemical composition, temperature and aggregate:binder ratio", ***Construction and Building Materials*** 50, 642-648, 2014.

Akçaözoğlu, K. ve Akçaözoğlu, S., Yüksek Sıcaklığın Genleşmiş Kil Agregalı Hafif Betonun Basınç Dayanımına Etkisi, ***N.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Sonuç Raporu*, FEB 2011/20,** Niğde, 2012.

Akçaözoğlu, S. and Atiş, C.D., "Effect of granulated blast furnace slag and fly ash addition on the strength properties of lightweight mortars containing waste PET aggregates", ***Construction and Building Materials*** 25, 4052-4058, 2011.

Akçaözoğlu, S., Atiş, C.D. and Akçaözoğlu, K., "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete", ***Waste Management*** 30(2), 285-290, 2010.

Akçaözoğlu, S.,Akçaözoğlu, K. and Atiş, C.D., “Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)”, ***Composites Part B-Engineering*** 45(1), 721-726, 2013.

Akman, M.S., Yapı Hasarları ve Onarım İlkeleri, ***TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası***, İstanbul, 2000.

Aköz, F. ve Yüzer, N., “Yüksek sıcaklığın nedenleri ve betonarme elemanlara etkileri”, ***Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi*** 3, İstanbul, 1994.

Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A. and Gutierrez, A., “Influence of content and particle size of waste PET bottles on concrete behavior at different w/c ratios”, ***Waste Management*** 29, 2707-2716, 2009.

Al-Otaibi, S., “Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass”, ***Construction and Building Materials*** 22, 2059-2067, 2008.

Al-Sibahy, A. and Edward, R., “Thermal behaviour of novel lightweight concrete at ambient and elevated temperatures: Experimental, modelling and parametric studies”, ***Construction and Building Materials*** 31, 174-187, 2012.

Altan, E. and Erdoğan, S.T., “Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures”, ***Cement and Concrete Composites*** 34, 131-139, 2012.

Andıç-Çakır, Ö. and Hızal, S., “Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self-consolidating lightweight aggregate concrete”, ***Construction and Building Materials*** 34, 575-583, 2012.

Andrade, C., Alonso, C. and Khoury, G.A., Relating microstructure to properties. Course on Effect of Heat on Concrete, ***International Centre for Mechanical Sciences (CISM)***, Italy, 2003.

Ashrae Temel El Kitabı (Fundemantals): Yakacaklar ve Yanma, ***Tesisat Mühendisleri***

Derneği Teknik Yayınları: 2, Bölüm 15, Ankara, 1997.

ASTM C 597-09. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ***American Society for Testing and Materials***, USA, 2010.

ASTM C618-12a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ***ASTM International***, USA, 2012.

ASTM C-989. Standard specification for ground granulated blast furnace slag for use in concrete and mortars, ***Annual book of ASTM Standards***, 1994.

Atiş, C.D., Bilim, C., Çelik, Ö. and Karahan, O., "Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar", ***Construction and Building Materials*** 23, 548-555, 2009.

Aydın, S. and Baradan, B., "The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars", ***Composites Part B-Engineering*** 45, 63-69, 2013.

Aydın, S., Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi, Doktora Tezi, ***Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İzmir, 2010.

Bakharev, T., Sanjayan, J.G. and Cheng, Y.B., "Alkali activation of Australian slag cements", ***Cement and Concrete Research*** 29(1), 113-120, 1999a.

Bakharev, T., Sanjayan, J.G. and Cheng, Y.B., "Effect of elevated temperature curing on properties of alkali activated slag concrete", ***Cement and Concrete Research*** 29(10), 1619-1625, 1999b.

Bakharev, T., Sanjayan, J.G. and Cheng, Y.B., "Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali-aggregate reaction***", Cement and Concrete Research*** 31, 331-334, 2001.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), ***Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları***, Yayın no: 298, İzmir, 2002.

Bernal, S.A., Gutierrez, R.M.D., Pedraza, A.L., Provis, J.L., Rodriguez, E.D. and Delvasto, S., "Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes", ***Cement and Concrete Research*** 41, 1-8, 2011a.

Bernal, S.A.,Provis, J.L., Rose, V. and Gutierrez, R.M., "Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends", ***Cement and Concrete Composites*** 33,46-54, 2011b.

Bernal, S.A., Gutierrez, R.M. and Provis, J.L., "Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends", ***Construction and Building Materials*** 33, 99-108, 2012.

Bilim, C., Yüksek fırın cürufu katkısının çimento tabanlı malzemelerde kullanılabilirliği, Doktora Tezi, ***Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Adana, 2006.

Bilim, C., "Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material", ***Construction and Building Materials*** 25, 3175-3180, 2011.

Bilim, C., Karahan, O., Atiş, C.D. and İlkentapar, S., "Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing conditions", ***Materials and Design*** 44, 540-547, 2013.

Binici, H., Durgun, M.Y., Rızaoğlu, T. and Koluçolak, M., "Investigation of durability properties of concrete pipes incorporating blast furnace slag and ground basaltic pumice as fine aggregates", ***Scientia Iranica*** 19(3), 366-372, 2012.

Byfors, K.K., Lehtonene, V., Pyy H. and Romben, L., "Durability of concrete made with alkali-activated slag", ***Third International Conference on the Use of Natural Pozzolans, FlyAsh, Blast Furnace Slag and Silica Fume in Concrete***, ACI SP-114, 2, pp.1429-1466, 1989.

Canbaz, M., "Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu harçlarda asit etkisi", ***Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*** 16, 69-80, 2008.

Chan, Y.N., Luo, X. and Sun, W., "Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 °C", ***Cement and Concrete Research*** 30(2), 247-251, 2000.

Chi, M., "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, 2012.

Choi, Y.W., Moon, D.J., Chung, J.S. and Cho, S.K., "Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete", ***Cement and Concrete Research*** 35, 776-781, 2005.

Choi, Y.W., Moon, D.J., Kim, Y.J. and Lachemi, M., "Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles", ***Construction and Building Materials*** 23, 2829-2835, 2009.

Collins, F. and Sanjayan, J.G., "Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na_2CO_3", ***Cement and Concrete Research*** 28, 655-664, 1998.

Collins, F. and Sanjayan, J.G., "Workability and mechanical properties of alkali activeted slag concrete", ***Cement and Concrete Research*** 29, 455-458, 1999a.

Collins, F. and Sanjayan, J.G., "Strength and shrinkage properties of alkali activeted slag concrete containing porous coarse aggregate", ***Cement and Concrete Research*** 29, 607-610, 1999b.

Collins, F. and Sanjayan, J.G., "Mikrocracking and strength development of alkali activated slag concrete", ***Cement and Concrete Composites*** 23, 345-352, 2001.

Davidovits, J., "Properties of geopolymer cements", in: P.V. Krivenko (Ed.), ***Proceedings of First International Conference on Alkaline Cements and Concretes***, Kiev, Ukraine, 1, pp. 131-149, 1994.

Demirboğa, R., Türkmen, İ. and Karakoç, M.B., "Relationship between ultrasonic

velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete", ***Cement and Concrete Research*** 34, 2229-2236, 2004.

Demirel, B. and Keleştemur, O., "Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume", ***Fire Safety Journal*** 45, 385-391, 2010.

Erdoğan, T.Y., Beton, ***ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim S. Yayını***, Ankara, 2003.

Escalante-Garcia, J.I., Magallanes-Rivera, R.X. and Gorokhovsky, A.,"Waste gypsum-blast furnace slag cement in mortars with granulated slag and silica sand as aggregates", ***Construction and Building Materials*** 23, 2851-2855, 2009.

Esmaily, H. and Nuranian, H., "Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali-activated slag", ***Construction and Building Materials*** 26, 200-206, 2012.

Frigione, M., "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete", ***Waste Management*** 30(6), 1101-1106, 2010.

Gavela, S., Karakosta, C., Nydriotis, C., Kaselouri-Rigopoulou, V., Kolias, S., Tarantili, P.A., et al., "A study of concretes containing thermoplastic wastes as aggregates", ***Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures***, Barcelona, p.911-918, Spain, 2004.

Georgali, B. and Tsakiridis, P.E., "Microstructure of fire-damaged concrete. A case study", ***Cement and Concrete Composites*** 27, 255-259, 2005.

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Mahmood, S.F., Öz, H.Ö. and Mermerdaş, K.,"Recycling ground granulated blast furnace slag as cold bonded artificial aggregate partially used in self-compacting concrete", ***Journal of Hazardous Materials*** 235-236, 352-358, 2012.

Gifford, P.M. and Gillot J.E., "Alkali-silica reaction (asr) and alkali carbonate reaction (acr) in alkali-activated blast furnaces lagcement (abfsc) concrete", ***Cement and***

Concrete Research 26, 21-26, 1996.

Guerrieri, M. and Sanjayan, J.G., "Behavior of combined fly ash/slag-based geopolymers when exposed to high temperatures", ***Fire and Materials*** 34, 163-175, 2010.

Haddad, R.H. and Shannis L., "Post-fire behavior of bond between high strenth pozzolanic concrete and reinforcing steel", ***Construction and Building Materials*** 18, 425-435, 2004.

Hamalı, Y., Metakaolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, ***İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul, 2007.

Hertz, K.D.,"Concrete strength for fire safety design", ***Magazine of Concrete Research***, 57(8), 445-453, 2005.

Jimenez, A.F. and Palomo, J.,"Composition and microstructure of alkali-activated fly ash binder: Effect of the activator", ***Cem. and Concrete Research*** 35, 1984-1992, 2005.
Jimenez, A.F. and Puertas, F., "Alkali-activated slag cements: kinetic studies", ***Cement and Concrete Research*** 27(3), 359-368, 1997.

Jimenez, A.F. and Puertas, F., "Alkali silica reaction in alkali-activated granulated slag mortar swith reactive aggregate", ***Cement and Concrete Research*** 32, 1019-1024, 2002.

Jimenez, A.F., Palomo, J.G. and Puertas, F., "Alkali activated slag mortars mechanical strength behaviour", ***Cement and Concrete Research*** 29, 1313-1321, 1999.

Khoury, G.A., "Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment",***Magazine of Concrete Research*** 44(161), 291-309, 1992.

Khoury, G.A. and Majorana, C., Effect of heat on concrete. ***International Centre for Mechanical Sciences***, p. 1-11, Udine, Italy, 2003.

Koide, H., Tomon, M. and Sasaki, T., Investigation of the Use of Waste Plastic as an

Aggregate for Lightweight Concrete, ***Sustainable Concrete Construction***, London, 2002.

Krivenko, P.V., "Alkaline cements: terminology classification, aspects of durability", in: H. Justnes (Ed.), ***Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement***, Gothenburg, Sweden, 1997.

Krizan, D. and Zivanovic, B., "Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements", ***Cement and Concrete Research*** (32), 1181-1188, 2002.

Li, C., Sun, H. and Li, L.,"A review: the comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements", ***Cement and Concrete Research*** 40, 1341-1349, 2010.

Murri, A.N., Rickard, W.D.A., Bignozzi, M.C. and Riessen, A., "High temperature behavior of ambient cured alkali-activated materials based on ladle slag", ***Cement and Concrete Research*** 43, 51-61, 2013.

Neville, A.M., Properties of Concrete, Fourth Edition, ***Longman Scientific and Technical***, p. 581-585, New York, USA, 2000.

Newman, J. and Choo, B.S., Advanced Concrete Technology Processes, Butterworth-Heinemann, **An Imprint of Elsevier**, UK, 2003.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S.,"Alkali-activated binders: a review",***Construction and Building Materials*** 22(7), 1305-1322, 2008.

Palacios, M. and Puertas, F., "Effect of super plasticizer and shrinkage reducing admixtures on alkali activated slag pastes and mortars, ***Cement and Concrete Research*** 35, 1358-1367, 2005.

Papayianni, I. and Valliasis, T.H., "Heat deformations of fly ash concrete", ***Cement & Concrete Composites*** 27, 249-254, 2005.

Pehlivan, E., Ünal, S. ve Tunçsiper, B., Plastik ambalaj malzemelerinin, hayatımızdaki yeri ve bunların geri kazanılması ve azaltımında çağdaş yöntemler, ***Polimer İşleme ve Geri Kazanımı Sempozyumu***, Mersin, s.114-128, 2004.

Pera, J.,"Metakaolin and calcined clays",***Cement and Concrete Composites*** 23(6), iii, 2001.

Piesta, J.,"Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste", ***Materials and Structures***, 17, 415-420, 1984.

Plastics Europe, Association of Plastics Manufacturers. Home, Discover Plastics, Plastics Materials, PET. http://www.plasticseurope.org, 2008.

Postacıoğlu, B., Beton, Cilt 2, ***Matbaa Teknisyenleri Basımevi***, İstanbul, 1986.

Puertas, F., Amat, T., Jimenez, F.A. and Vazquez, T.,"Mechanical and durable behavior of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibers", ***Cement and Concrete Research*** 33, 2031-2036, 2003.

Rashad, A.M., "Alkali-activated metakaolin: A short guide for civil Engineer-An overview", ***Construction and Building Materials*** 41, 751-765, 2013.

Rashad, A.M., Bai, Y., Basheer, P.A.M., Collier, N.C. and Milestone, N.B., "Chemical and mechanical stability of sodium sulfate activated slag after exposure to elevated temperature", ***Cement and Concrete Research*** 42, 333-343, 2012.

Regourd, M., Structure and Performance of Cements, Ed, by P. Barnes, ***Appl. Science Publication***, London, 1986.

Riley, M.A., "Possible new method for the assessment of fire damaged concrete", ***Magazine of Concrete Research*** 43, 87-92, 1991.

Rovnanik, P., Bayer, P. and Rovnanikova, P.,"Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures",***Construction and Building Materials*** 47,

1479-1487, 2013.

Roy, D.M. and Idorn, G.M., “Hydration, structure and blast furnace slag cements, mortars and concrete”, ***ACI Journal Proceedings*** 79 (6), 445-457, 1982.

Roy, D.M., “Alkali activated cements: opportunitie sand challenges”, ***Cement and Concrete Research***, 29(2), 249-254, 1999.

Sajedi, F. and Razak, H.A., “The effect of chemical activators on early strength of ordinary Portland cement-slag mortars”,***Construction and Building Materials*** 24, 1944-1951, 2012.

Scherefler, B.A., Gawin D., Khoury, G.A. and Majorana, C.E., Physical, mathematical & numerical modelling, ***International Centre for Mechanical Sciences***, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy, 2003.

Shi, C. and Day, R.L., “Early strength development and hydration of alkali-activated blast furnace slag/fly ash blends”, ***Advances in Cement Research*** 11(4), 189-196, 1999.

Shi, C., Roy, D.M. and Krivenko P.V., Alkali-activated Cements and Concretes, Ed. ***Taylor & Francis***, London, UK., 2006.

Shi, C., Jimenez, A.F. and Palomo, A.,“New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement”, ***Cement and Concrete Research*** 41, 750-763, 2011.

Souza, P.S.L. and Dal Molin, D.C.C.,“Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity”, ***Cement and Concrete Research***, 35, 1993-1998, 2005.

Shoaib, M.M., Balaha, M.M. and Ahmed, S.A.,“Influence of aggregate type on mortar thermal stability”, ***Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*** 7(4), 217-224, 2000.

Tokyay, M. ve Erdoğdu, K., Cüruflar ve Curuflu Çimentolar, ***Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği***, Ankara, 2002.

Topçu, İ.B., Beton Teknolojisi,***Uğur Yayınları***, Eskişehir, 2006.

Topçu, İ.B. ve Demir, A., Yüksek sıcaklık uygulama süresinin harç özeliklerine etkisi,***7. Ulusal Beton Kongresi***, s.455-463, İstanbul, 2007.

Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., "Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu harçların yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki mikroyapıları", ***Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*** 10(1), 319-326, 2009.

TS 3624. Sertleşmiş betonda özgül ağırlık, su emme ve boşluk oranı tayin metodu, ***Türk Standartları Entitüsü***, Ankara, 1981.

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, ***Türk Standartları Entitüsü***, Ankara, 2003.

TS EN 1015-11. Kagir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, ***Türk Standartları Entitüsü***, Ankara, 2000.

Vu, D.D., Strength Properties of Metakaolin-Blended Paste, Mortar and Concrete, ***Delft University Press***, Netherlands, 2002.

Wang, J., Wu, X.L, Wang, J.X., Liu, C.Z., Lai, Y.M., Hong, Z.K. and Zheng, J.P.,"Hydrothermal synthesis and characterization of alkali-activated slag-fly ash-metakaolin cementitious materials", ***Microporous and Mesoporous Materials*** 155, 186-191, 2012.

Wang, W.C., Wang, H.Y. and Lo, M.H., "The engineering properties of alkali-activated slag pastes exposed to high temperatures",***Construction and Building Materials*** 68, 409-415, 2014.

Wang, S.D. and Scrivener, K.L.,“Hydration products of alkali activated slag cement”, ***Cement Concrete Research*** 25, 561-571, 1995.

Whitehurst, E.A., “Soniscope tests concrete structures. research and development laboratories of the Portland Cement association”. ***J Am Concrete I*** 47, 433-444, 1951.

Wu, X., Jiang, W. and Roy, D.M., “Early activation and properties of slagcement”,***Cement and Concrete Research*** 20(6), 961-974, 1990.
Yalçın, H. ve Gürü, M., Çimento ve Beton, ***Palme Yayıncılık***, Ankara, 2006.

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

Yunsheng, Z., Wei, S., Qianli, C. and Lin, C., “Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer”, ***Journal of Hazardous Materials*** 143, 206-213, 2007.

Yüksel, İ., Bilir, T. and Özkan, Ö.,“Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate”, ***Building and Environment*** 42, 2651-2659, 2007.

Yüzer, N., Aköz, F. ve Dokuzer-Öztürk, L., “Yangına maruz yapılarda betonun basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi”, ***Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi*** 51-60, 2001.

Zivica, V., “Effectiveness of new silica fume alkali activator”, ***Cement and Concrete Composites*** 28 (1), 21-25, 2006.

Zoldners, N.G.,“Thermal properties of concrete under sustained elevated temperatures”, ***ACI Publication*** SP-25, 1-31, 1971.

ÖZ GEÇMİŞ

Cüneyt ULU 1986'da Adana'nın Kozan ilçesinde doğdu. 1997'de Kozan Şaban Ata İlkokulunu, 2004'te Kozan Anadolu Lisesini bitirdi. 2005 yılında Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girdi. Bu bölümden Ağustos 2011'de mezun oldu. 2011 yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 2011-2012 yılları arasında TOKİ 300 Yataklı Niğde Devlet Hastanesi inşaatında MOY İnşaat şantiye şefi olarak çalışma hayatına başladı. 2012-2013 yılları arasında BetonArge yapı malzemeleri Araştırma geliştirme projesinde Ar-Ge Mühendisi olarak çalıştı. 2012 yılının sonlarına doğru Niğde Mavi Yapı Denetim Şirketi kurucu ortağı ve yöneticiliği görevinde bulundu. Ocak 2013'ten itibaren Kozan Belediyesinde İnşaat Mühendisi kadrosunda Fen İşleri Müdür Vekilliği ile İmar ve Şehircilik Müdür Vekilliği görevlerini yürüttü. Evli ve 1 çocuk sahibi olan Cüneyt ULU Kozan Belediyesi bünyesinde çalışma hayatına devam etmektedir.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet uluslararası makale üretilmiştir. Üretilen çalışma aşağıda sunulmuştur.

Akçaözoğlu, S. and Ulu, C., "Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali-activated blast furnace slag/metakaolin blends", ***Construction and Building Materials*** 58, 31-37, 2014.