

T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ  
YÜKSEK FIRIN CÜRUFUFLU BETONLARIN  
HİDRATASYON SICAKLIĞININ ARAŞTIRILMASI

ABDULLAH AÇIKGÖZ

Şubat 2015



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ  
YÜKSEK FIRIN CÜRUFULU BETONLARIN  
HİDRATASYON SICAKLIĞININ ARAŞTIRILMASI

ABDULLAH AÇIKGÖZ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

Şubat 2015

**Abdullah AÇIKGÖZ** tarafından **Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU** danışmanlığında hazırlanan “**Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu Betonların Hidratasyon Sıcaklığının Araştırılması**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Niğde Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Fatih ÖZCAN, Niğde Üniversitesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim Özgür DENEME, Aksaray 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**

## **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.

Abdullah AÇIKGÖZ

## ÖZET

### ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU BETONLARIN HİDRATASYON SICAKLIĞININ ARAŞTIRILMASI

AÇIKGÖZ, Abdullah

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU  
Şubat 2015, 66 sayfa

Bu çalışmada, alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu betonların hidratasyon sıcaklığı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu kullanılarak hazırlanan 18 karışım ile birlikte, CEM I ve CEM II çimentoları kullanılarak hazırlanan 6 şahit karışım olmak üzere toplam 24 farklı karışım üretilmiştir. Karışımlarda kullanılan bağlayıcı dozajları 300, 350 ve 400 kg/m<sup>3</sup> olup su/bağlayıcı oranı ise 0.5'tir. Yüksek fırın cürufunu aktive etmek için sodyum hidroksit (NaOH) ile NaOH-sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) karışımı kullanılmıştır. Karışımların sodyum içerikleri (Na<sup>+</sup>) %4, %6 ve %8 olarak belirlenmiştir. Üretilen numunelerin basınç dayanımları ve hidratasyon sıcaklıkları ölçülmüştür. 120 saat boyunca her 15 dakikada bir sıcaklık değişimi ölçülerek kaydedilmiştir. Deney sonuçları, karışımlardaki bağlayıcı miktarının ve Na dozajının artması ile birlikte basınç dayanımlarının ve hidratasyon sıcaklıklarının arttığını göstermiştir. Aktivatör olarak NaOH ile Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımının kullanılması numunelerin basınç dayanımlarını arttırmış fakat hidratasyon sıcaklıklarını düşürmüştür. Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu numunelerin tamamının hidratasyon sıcaklıkları çimento kullanılarak üretilen numunelere göre oldukça düşük çıkmıştır.

*Anahtar Sözcükler:* Alkalilerle aktive edilmiş cüruf, hidratasyon sıcaklığı, yüksek fırın cürufu, beton, basınç dayanımı.

## SUMMARY

### THE INVESTIGATION OF HDYRATION TEMPRATURE OF ALCALI ACTIVETED SLAG CONCRETE

AÇIKGÖZ, Abdullah

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assistant Professor Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

February 2015, 66 pages

In this study the hydration temperature of alkali activated blast furnace slag concrete was investigated. Twenty four different mixtures were prepared for the laboratory tests. In the reference 6 mixtures, CEM I and CEM II cements was used as binder. In the other 18 mixtures alkali-activated blast furnace slag was used. The binder dosages were 300, 350 ve 400 kg/m<sup>3</sup> and the water-binder (w/b) ratio used in the mixtures was 0.50. Sodium hydroxide (NaOH) pellets and the mixture of NaOH-liquid sodium silicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) were used for activation of slag. The Na<sup>+</sup> contents of mixtures were 4%, 6% and 8%. The compressive strength and hydration temperature of produced concretes were measured. The temperature change of specimens measured in every 15 minutes until 120 hours. The test results showed that, the compressive strengths and hydration temperatures of the mixtures increased depending on increasing the amount of binder and Na<sup>+</sup>. The use of NaOH-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> mixture as activator increased compressive strength but decreased hydration temperature of the specimens. The hydration temperatures of all alkali activated blast furnace slag specimens were lower than the specimens produced by using cement as binder.

*Keywords: Alkali activated slag, hydration temperature, blast furnace slag, concrete, compressive strength.*

## ÖN SÖZ

Bu çalışmada, başta ülkemiz olmak üzere, dünyada atık malzemelerin değerlendirilmesi ve çevreye verilen zararı en aza indirmenin yanında, bu atık malzemelerden olan yüksek fırın cürufunun en verimli şekilde nasıl kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla laboratuvar deneyleri yürütülmüştür. Çalışma kapsamında, alkalilerle (NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ile hazırlanan betonun ve CEM I - CEM II çimentoları ile hazırlanan şahit betonlarının hidrasyon sıcaklığına etkisi ve basınç dayanımları araştırılmıştır. 300, 350 ve 400 doz için, %4-6-8 Na oranlarında hazırlanan 18 adet farklı beton karışımının hidrasyon sıcaklığı, yarı adyabatik yöntemle 120 saat boyunca her 15 dakikada bir sıcaklık değişimi ölçülerek kaydedilmiştir. Ayrıca 3,7 ve 28 gün kürde bekletilen numunelerin basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde kullanılan alkali aktivatörlerin betonun hidrasyon sıcaklığı ve maksimum sıcaklığa ulaşma süreleri üzerindeki etkileri ile kullanılan bağlayıcı ve aktivatörlere göre basınç dayanımlarının değişimleri incelenmiş ve yorumlanmaya çalışılmıştır.

Hem lisans hem de yüksek lisans eğitimim süresince, her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU'na içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında desteklerinden ötürü Sayın Yrd. Doç. Dr. Semiha AKÇAÖZOĞLU'na, Doç. Dr. Fatih ÖZCAN'a, Doç. Dr. Mustafa SARIDEMİR'e, Doç. Dr. Metin Hakan SEVERCAN'a teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarında, Mehmet Onur KILINÇ, Sefa HALICI ve Yasin Furkan UĞURLU kardeşlerime yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Ayrıca tüm hayatım boyunca benden her türlü desteklerini esirgemeyen ve her zaman her konuda yanımda olan aileme sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
ÖN SÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
FOTOĞRAF DİZİNİ.....	xiii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1 Yüksek Fırın Cürufu.....	3
2.1.1 Yüksek fırın cürufunun üretimi.....	5
2.1.2 Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri.....	8
2.1.3 Yüksek fırın cürufunun hidrasyonu.....	8
2.1.4 Yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkisi.....	10
2.1.4.1 Yüksek fırın cürufunun taze beton özelliklerine etkisi.....	10
2.1.4.2 Yüksek fırın cürufunun sertleşmiş beton özelliklerine etkisi.....	11
2.1.5 Yüksek fırın cürufunun betonun dayanıklılık özelliklerine etkisi.....	12
2.1.5.1 Dayanıklılık özellikleri .....	12
2.1.5.2 Permabilite.....	12
2.1.5.3 Sülfata dayanıklılık .....	13
2.1.5.4 Donma - çözülme dayanıklılığı.....	13
2.1.5.5 Aşınma dayanıklılığı.....	13
2.1.5.6 Alkali - silika reaksiyonu.....	14
2.1.5.7 Klor geçirgenliği.....	14
2.1.5.8 Karbonatlaşma.....	15
2.1.6 Yüksek fırın cüruflarının kullanım alanları.....	15
2.1.6.1 Yüksek fırın cüruflarının inşaat sektöründe kullanım alanları.....	17
2.1.6.1.1 Hafif beton agregası olarak kullanım.....	17

2.1.6.1.2 Yol malzemesi ve asfalt betonu agregası olarak kullanımı.....	17
2.1.6.1.3 Katkılı çimento ve beton üretiminde kullanımı .....	17
2.1.6.1.4 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun cürüflü çimento üretiminde kullanımı.....	18
2.1.6.1.5 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton yapımında mineral katkı olarak kullanımı .....	18
2.2 Alkalilerle Aktive Edilen Yüksek Fırın Cürüflü Betonlar.....	19
2.2.1 Alkaliler.....	19
2.2.1.1 Sodyum hidroksit.....	21
2.2.1.1.1 Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	21
2.2.1.2 Sodyum silikat.....	21
2.2.2 AA-YFC bağlayıcılı betonlar.....	22
2.2.2.1 AA-YFC bağlayıcılı betonların avantajları.....	22
2.2.2.2 AA-YFC bağlayıcılı betonların dezavantajları.....	23
2.2.2.3 AA-YFC bağlayıcılı betonların tarihsel gelişimi.....	23
2.3 Hidratasyon Isısı.....	26
2.3.1 Betonda hidratasyon ısısı.....	26
2.3.2 Yüksek fırın cürufunun hidratasyonu.....	27
2.3.3 Yüksek fırın cürufunun hidratasyona etkisi.....	27
<b>BÖLÜM III MATERYAL VE METOD.....</b>	<b>29</b>
3.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri .....	29
3.1.1 Çimento.....	29
3.1.2 Yüksek fırın cürufu .....	30
3.1.3 Aktivatörler.....	30
3.1.3.1 Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).....	31
3.1.3.2 Sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ).....	31
3.1.4 Agregası.....	32
3.1.5 Karışım suyu .....	33
3.2 Beton Karışım Oranları .....	34
3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	36
3.4 Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneysel Çalışmalar .....	37

3.4.1 Basınç dayanımı .....	37
3.4.2 Hidratasyon sıcaklığının ölçülmesi .....	38
<b>BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>43</b>
4.1 Basınç Dayanımı .....	43
4.1.1 Bağlayıcı miktarının basınç dayanımına etkisi .....	44
4.1.2 Aktivatör tipinin basınç dayanımına etkisi .....	47
4.1.3 Sodyum (Na) dozajının basınç dayanımına etkisi .....	48
4.2 Hidratasyon Sıcaklığı.....	50
4.2.1 Bağlayıcı miktarının hidratasyon sıcaklığına etkisi.....	50
4.2.2 Bağlayıcı tipinin hidratasyon sıcaklığına etkisi.....	52
4.2.3 Aktivatör tipinin hidratasyon sıcaklığına etkisi.....	54
4.2.4 Sodyum dozajının hidratasyon sıcaklığına etkisi.....	56
<b>BÖLÜM V SONUÇLAR.....</b>	<b>57</b>
<b>BÖLÜM VI KAYNAKLAR .....</b>	<b>59</b>
<b>ÖZ GEÇMİŞ .....</b>	<b>66</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1	Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri .....	29
Çizelge 3.2	Kullanılan çimentoların fiziksel özellikleri .....	30
Çizelge 3.3	Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu (%) .....	30
Çizelge 3.4	Sodyum hidroksitin kimyasal kompozisyonu(%).....	32
Çizelge 3.5	Beton karışımında kullanılan agreganın eleklerden geçen miktarları .....	33
Çizelge 3.6	Bir metreküp betonu oluşturan malzeme miktarları .....	35
Çizelge 4.1	Numunelerin basınç dayanımı değerleri (MPa) .....	44
Çizelge 4.2	Numunelere ait maksimum sıcaklıklar ve maksimum sıcaklığa ulaşma süreleri .....	52

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Yüksek fırın cürufunun üretim sürecinin şematik olarak gösterimi ....	5
Şekil 2.2	Granülasyon yönteminin şematik gösterimi .....	6
Şekil 2.3	Peletleme yönteminin şematik gösterimi .....	7
Şekil 2.4	Cürufun kullanım alanları (Amerika Birleşik Devletleri) .....	16
Şekil 2.5	Cürufun kullanım alanları (Kanada) .....	16
Şekil 2.6	AA-YFC betonu ile inşa edilmiş bina .....	24
Şekil 2.7	AA-YFC ve PÇ betonu ile üretilmiş yollar .....	25
Şekil 2.8	AA-YFC ve PÇ betonu ile üretilmiş paneller .....	25
Şekil 3.1	Çalışmada kullanılan betona ait agreganın granülometri eğrisi .....	33
Şekil 3.2	Beton hidratasyon sıcaklık ölçümünde kullanılan yalıtımlı kutu .....	39
Şekil 3.3	TestLink SE309 dört kanallı datalogger.....	40
Şekil 3.4	4Extech RHT10 nem ve ısı ölçer datalogger .....	40
Şekil 4.1	Bağlayıcı miktarının NaOH kullanılarak hazırlanan karışımların basınç dayanımına etkisi .....	45
Şekil 4.2	Bağlayıcı miktarının NaOH+Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> kullanılarak hazırlanan karışımların basınç dayanımına etkisi .....	46
Şekil 4.3	Bağlayıcı miktarının çimento kullanılarak hazırlanan karışımların basınç dayanımına etkisi .....	46
Şekil 4.4	NaOH ve NaOH+Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> kullanılan ve %4 Na dozajında hazırlanan numunelerin basınç dayanımı değerleri .....	47
Şekil 4.5	NaOH ve NaOH+Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> kullanılan ve %6 Na dozajında hazırlanan numunelerin basınç dayanımı değerleri .....	48
Şekil 4.6	NaOH ve NaOH+Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> kullanılan ve %8 Na dozajında hazırlanan numunelerin basınç dayanımı değerleri .....	48
Şekil 4.7	Na dozajının NaOH kullanılarak hazırlanan numunelerde basınç dayanımı üzerine etkisi .....	49
Şekil 4.8	Na dozajının NaOH+Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> kullanılarak hazırlanan numunelerde basınç dayanımı üzerine etkisi.....	49
Şekil 4.9	Bağlayıcı miktarının hidratasyon sıcaklığına etkisi .....	51

Şekil 4.10	Bağlayıcı tipinin numunelerin hidrasyon sıcaklığı değişimine etkisi	53
Şekil 4.11	Aktivatör tipinin numunelerde oluşan hidrasyon sıcaklığına etkisi ..	55
Şekil 4.12	Na dozajı ile hidrasyon sıcaklığı ilişkisi .....	56

## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3.1	Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).....	31
Fotoğraf 3.2	Sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) .....	32
Fotoğraf 3.3	Taze betonun hazırlanması.....	36
Fotoğraf 3.4	Taze betonların kalıplara yerleştirilmiş hali.....	37
Fotoğraf 3.5	Basınç dayanımı test cihazı .....	38
Fotoğraf 3.6	Yarı adyabatik numune saklama kabı .....	41
Fotoğraf 3.7	Thermocouple'ın beton içine yerleştirilmesi .....	41
Fotoğraf 3.8	Sıcaklık ölçme düzeneği .....	42

## KISALTMA VE SİMGELER

### KISALTMA/SİMGE

Ş.O. Sıcaklığı : Şahit betonun ortam sıcaklığı

Ort. Sıcaklığı : Ortam sıcaklığı

YFC : Yüksek fırın cürufu

AA : Alkali ile Aktive Edilmiş

NH : Sodyum Hidroksit (NaOH)

NS : Sodyum Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

$\Delta t$  : Başlangıçtaki karışım sıcaklığı ile maksimum sıcaklık arasında ki fark

K.K : Kızdırma kaybı

w/c : Su çimento oranı

PÇ : Portland Çimentosu

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Türkiye demir çelik üretiminde dünya çapında önemli yere sahiptir. Ülkemizde demir çelik üretimi 1939 yılında başlamış ve 3 ilimizde önemli ölçüdeki üretim miktarları ile devam etmektedir. Ham demir üretiminde esas elde edilmek istenen ürünün yanında atık malzeme olarak elde edilen yüksek fırın cürufu (YFC), daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde yer alır. Demir filizi gangi, kok ve kireç taşının yanma sonrası atıkları YFC'yi meydana getirirler (Tokyay ve Erdoğan, 2003). Bu üretimin atığı olarak elde edilen YFC amorf yapısı nedeniyle puzolanik özellik göstermektedir.

Bilindiği gibi çimento, beton üretiminde kullanılan en pahalı bileşen konumdadır. Çimentoların teknik özellikleri ve miktarı, betonun performansına ve ekonomisine etki etmektedir. Bu yüzden puzolanik malzemeler, betonun maliyetini azaltmak ve çeşitli özelliklerini iyileştirmek amacıyla ya doğrudan katkı olarak ya da çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere betona katılmaktadır (Aruntaş, 1996).

Portland çimentosu kullanılmadan bir bağlayıcı üretimine yönelik çalışmalardan en ilgi çekeni, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların alkalilerle aktivasyonudur. Teorik olarak silika ve alümina içeren her malzeme alkalilerle aktive edilebilir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi amorf karakterli malzemeler bir aktivatör vasıtasıyla aktive edilerek bir bağlayıcıya dönüştürülebilmektedir. Aluminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda “geopolimer” adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu sonucunda çimento esaslı bağlayıcılardaki C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır (Aydın,2010). Yapılan çalışmalara bakıldığında, en çok kullanılan alkaliler; sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum sülfat ve sodyum silikattır. Sodyum karbonat ve sodyum sülfat doğal kaynaklardan elde edilir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit ise sadece üretilerek elde edilir (Caijun vd., 2006;Özodabaş, 2014).

Beton teknolojisi açıdan önemli diğer bir konu da betonun hidrasyon sıcaklığına bağlı oluşan termal etki kaynaklı çatlaklardır. Termal etki kaynaklı çatlak oluşumlarının

olabileceği tüm yapılar için mevcut olduğu bilinmektedir. Ancak kütle (masif) beton yapılarda termal etki daha fazla önem arz etmektedir. Termal etkinin önemi bu tip yapılarda malzeme seçimi ve karışım oranları tasarımı yapılırken dayanıklılık, ekonomi ve termal etkiler ön planda olup, dayanım sıklıkla ikincil derecede ele alınmaktadır. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyonun ekzotermik olması ve açığa çıkan ısının transferi için büyük hacimli betonlarda çok uzun bir süreye ihtiyaç olması nedeni ile oldukça yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılabilmektedir. Beton henüz erken yaşlardaiken sıcaklığının yüksek değerlere ulaşması ve sıcaklık kayıp hızının da bu tip beton yapılarda oldukça düşük olması nedeniyle soğuma çokuzun bir süreyi gerektirmektedir. Soğumanın tamamlanarak çevre sıcaklığına ulaşıncaya kadar ise beton dayanımı ve elastisite modülü artmaktadır. Uzun vadede betonun soğuyarak çevre sıcaklığına ulaşılması ile birlikte önemlibirim boy değişimleri (kısalma) ve dolayısı ile çekme gerilmelerinin oluşumunu da kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle, yapıda ciddi hasar oluşumlarının önlenmesi, yapısal bütünlüğün bozulmaması, aşırı sızma riskinin önlenmesi, servis ömrünün kısalmaması ve estetik olarak kabul edilemez hasar oluşumlarının meydana gelmemesi için termal etkilerin oldukça dikkatle ele alınması zorunludur.

Bu çalışmada, alkalilerle (NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ile hazırlanan betonun ve CEM I - CEM II çimentoları ile hazırlanan şahit betonlarının hidrasyon sıcaklığına etkisi ve basınç dayanımları araştırılmıştır. 300,350 ve 400 doz için, %4-6-8 Na oranlarında hazırlanan 18 adet farklı beton karışımının hidrasyon sıcaklığı, yarı adyabatik yöntemle 120 saat boyunca her 15 dakikada bir sıcaklık değişimi ölçülerek kaydedilmiştir. Ayrıca 3,7 ve 28 gün kürde bekletilen numunelerin basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde kullanılan alkali aktivatörlerin betonun hidrasyon sıcaklığı ve maksimum sıcaklığa ulaşma süreleri üzerindeki etkileri ile kullanılan bağlayıcı ve aktivatörlere göre basınç dayanımlarının değişimleri incelenmiştir.

## BÖLÜM II

### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

#### 2.1 Yüksek Fırın Cürufu

Ham demir üretiminde esas elde edilmek istenen ürünün yanında atık malzeme olarak elde edilen yüksek fırın cürufu (YFC), daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde yer alır. Demir filiz gangi, kok ve kireç taşının yanma sonrası atıkları YFC' yi meydana getirirler (Tokyay ve Erdoğan, 2003). Granüle yüksek fırın cürufu ise, ergimiş cürufun hızla soğutulması ile elde edilir, kütlece en az 2/3 oranında camsı cüruf ihtiva eder ve uygun şekilde aktifleştirildiğinde hidrolik özellikler gösterir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özellikli malzeme olarak kullanımı, 1774 yılında Lariot tarafından öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile söndürülmüş kirecin birleştirilmesiyle hazırlanan malzeme karışımının üzerinde yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır. Öğütülmüş yüksek fırın cüruflarının hidrolik bağlayıcılığı ise 1862 yılında Emil Langen tarafından Almanya'da keşfedilmiştir. Portland çimentosu klinkerinin granüle yüksek fırın cürufu ile birlikte öğütülmesi ile elde edilen portland yüksek fırın cürufu çimentosunun üretimi de 1892 yılında Almanya'da başlamıştır (Erdoğan, 1995; Tokyay, 2003). Cürufların, çimento ve beton sektörlerinde çok çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır. Geleneksel çelik üretim teknikleriyle elde edilen cüruflar, kristal yapıda olduklarından ya hiç kullanılmaz ya da dolgu malzemesi olarak yollarda ve betonda kullanılır. Buna karşılık, modern çelik üretimi yapan tesislerden elde edilen cüruflar, camsı (amorfl) yapıya sahip olduklarından, bunları çimentolu sistemlerde kullanmak mümkündür. Tüm cüruflar arasında en önemlisi ve en yaygın kullanım alanına sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır (Gündeşli, 2008).

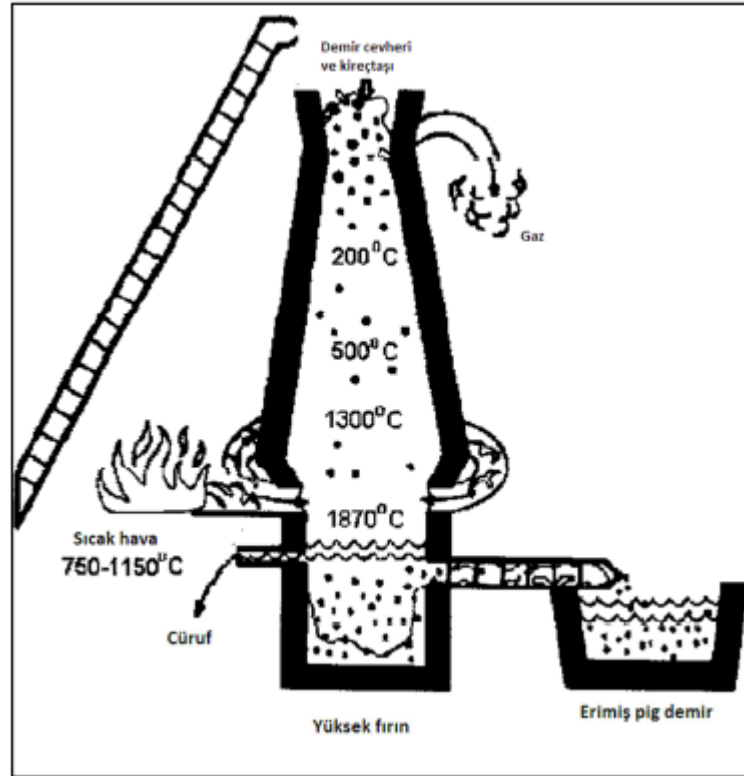
Türkiye'de yüksek fırın cürufunun üretildiği tesisler demir çelik fabrikalarıdır. Bunlar İskenderun, Karabük ve Ereğli olmak üzere 3 ilimizde faaliyet göstermektedirler. YFC betonun uzun dönemde dayanımını ve durabilitesini artırdığı, beton geçirimsizliğini azalttığı ve kimyasal etkenlere karşı betonun dayanıklılığını arttırdığı gibi olumlu etkileri birçok araştırmada karşımıza çıkmaktadır. Yüksek fırın cürufu betonların sülfat dayanımları portland çimentolu betonlara göre daha dirençlidir (Yazıcı, 2006; Binici vd., 2010). Özkan, yapmış olduğu çalışmada %50 YFC + %50 çelikhane cürufu katkılı harç

ve betonların en iyi sonuçları verdiğini görmüştür. Bu betonların özellikle sülfatlara ve yüksek sıcaklığa portland çimentosuna göre daha dayanıklı olduğu görülmüştür (Özkan, 2006;Özodabaş, 2014). YFC kullanımı betonun hidrasyonu sırasında, hidrasyon ısısını düşürdüğü için kütle beton dökümlerinde prizi yavaşlatmasından dolayı soğuk derz oluşmasını önler. Sülfat çimentonun bazı bileşenleri ile reaksiyona girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Bu saldırı sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi etrenjit (DEF; sülfat etkisiyle genişleyen tuz sertleşmiş betonu çatlatıp parçalar) ve alçı taşı oluşturması ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünleri betonda genişleme yaratarak çatlaklara ve dağılmalara yol açar. Sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan beton içine girebilir. Çorak topraklarda, özellikle deniz yapılarında, ayrıca çimento içine katılan alçı taşının oluşturacağı SO<sub>3</sub> miktarını çimento ağırlığının %3'ü ile sınırlamıştır. Yüksek fırın cürufunun kimyasal yapısında C<sub>3</sub>A bulunmamasından dolayı cürufu çimentoların içeriğindeki C<sub>3</sub>A, portland çimentolarına kıyasla daha düşük olduğundan sülfatlı ortamlara karşı daha dayanıklıdır. Binici ve arkadaşları, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve bazaltik ponza'yı ayrı ayrı veya birlikte içeren betonların mekanik aşınma ve geçirgenlik özelliklerinin araştırmıştır. İnce agreganın yüksek fırın cürufu veya bazaltik ponza ile yer değiştirme yüzdeleri bu çalışmada değişik şekillerde araştırılmıştır. Üretilen betonların aşınma dayanımları incelenmiştir. Test sonuçları betonda yüksek fırın cürufu ve bazaltik ponza varlığının aşınmazlık ve su geçirimsizliğine olumlu etkiler yaptığını göstermiştir. Sonuçlar beton aşınması ve geçirgenliğinin katkı tipi ve miktarına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Diğer yandan özellikle ponza katkılı örneklerin permeabilite değerleri kontrol örneğinden daha düşük elde edildiğini belirtmişlerdir (Binici vd., 2007;Özodabaş, 2014). Ayrıca deniz yapılarında kullanılacak betonlarda ince agrega olarak ponza ve yüksek fırın cürufu katkılarının kullanılmasının beton durabilitesini geliştirileceğini göstermiştir (Binici vd., 2008). Ayrıca yüksek fırın cürufu %50 oranında kullanıldığında en düşük klorür sızması olduğu ifade edilmiştir (Sadok ve Al, 2011). Kömür altı tozu ve yüksek fırın cürufu ile üretilen harçlar 800 °C ısıda 90 gün bekletilmişlerdir. Ağırlık kaybı, basınç dayanımı, elastisite modülü, çatlak oluşumu gibi özellikler incelenmiş sonuç olarak kömür altı tozu ile elde edilen harçların özellikleri yüksek fırın cürufu ile elde edilen harçlardan daha iyi neticeler verdiği anlaşılmıştır (Yüksel vd., 2011).

Yüksek fırın cürüflü harçların sodyum sülfatlı sulara ve sülfirik asitlere maruz bırakılmış ve sonuç olarak geleneksel harçlardan daha iyi dayanıklılık sağladıkları görülmüştür (Osborne, 1999).

### 2.1.1 Yüksek fırın cürufunun üretimi

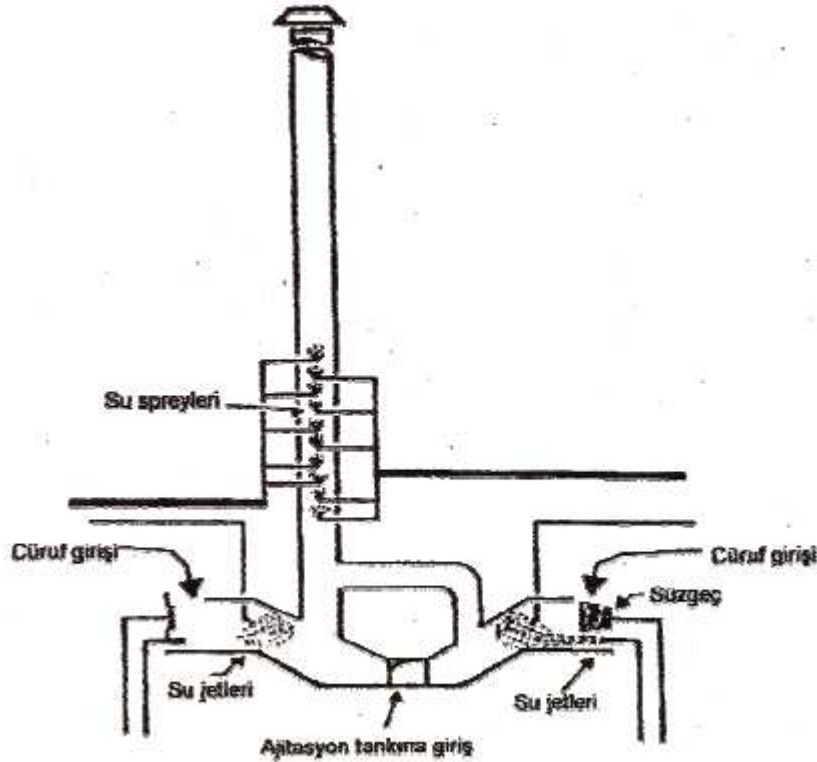
Yüksek fırın cürufu, yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında endüstriyel bir yan ürün olarak elde edilen atık üründür. Demir cevherleri, hematit ( $Fe_2O_3$ ), magnetit ( $Fe_3O_4$ ), limonit ( $Fe_3O_4 \cdot nH_2O$ ) ve siderit ( $FeCO_3$ ) gibi demiroksit bileşenlerinin yanı sıra aynı zamanda küçük miktarlarda da olsa silis, alümin, kil, kükürt, fosfor, mangan gibi yabancı maddeleri de bünyesinde bulundurmaktadır. Şekil 2.1.'de de görüldüğü gibi, cevher içerisindeki demirin elde edilebilmesi için cevherin, içerdiği yabancı maddelerden arındırılması ve demiroksitin ayrıştırılarak içerisindeki oksijenin çıkartılması gerekmektedir.



Şekil 2.1. Yüksek fırın cürufunun üretim sürecinin şematik olarak gösterimi (Caijun ve ark., 2006)

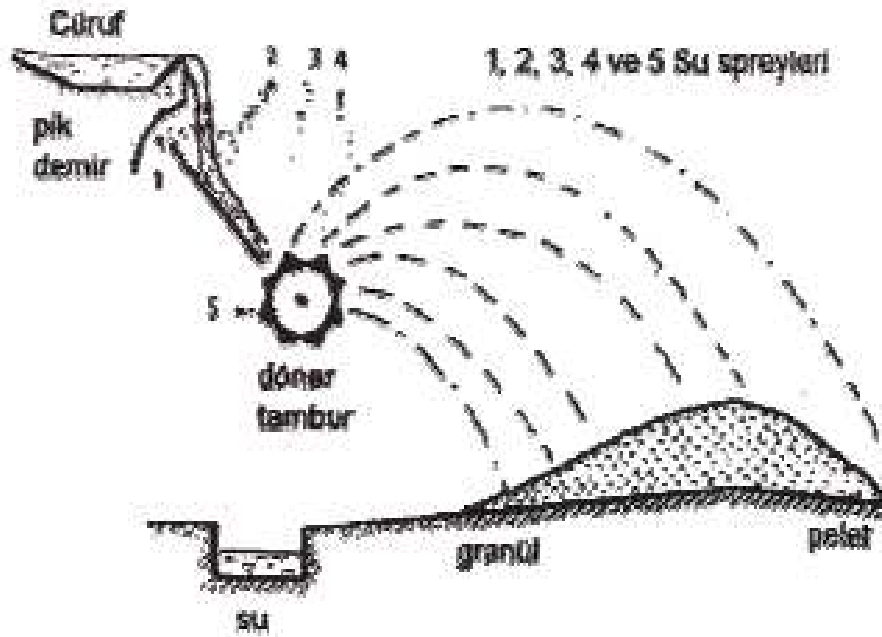
Fırından çıkarılan cüruf yaklaşık olarak 1400–1600 °C sıcaklıkta olduğu için, kullanılmadan önce soğutulması gerekmektedir. Cürufun uygun bir forma getirilmesi ve

bağlayıcı bir malzeme olarak kullanılması için granülasyon ve peletleme (hava granülasyonu) olmak üzere iki farklı yöntem mevcuttur. 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 yapılu bu cüruflar, kırılarak agrega haline getirildiğinde, hidrolik bağlayıcılık özellikleri bulunmadığından, ancak yol dolgu malzemesi ya da beton agregası olarak kullanılabilir. Granülasyon yönteminde, camsı yapıdaki granüle yüksek fırın cürufun elde edilebilmesi, önceleri, basit olarak, eriyik cürufun su içerisine aniden daldırılması ile mümkün olmaktadır. Ancak, Şekil 2.2.'de verilen en modern granülasyon yöntemlerinde ise, erimiş haldeki cüruf yüksek basınçlı su fışkıyelerinin içinden geçmeye zorlanır. Bu da, cürufun hızlı bir şekilde en büyük tane büyüklüğü yaklaşık 5 mm olan camsı granüllere dönüşüp soğumasına neden olur. Buradaki su sıcaklığı yaklaşık olarak 50°C'nin altında olup soğutma işlemi çok miktarda suyun püskürtülmesi (kütlece suyun cürufa oranı 10) ile yapılmaktadır. Bu işlem sonucunda cürufun içerdiği su miktarı yaklaşık olarak %30 civarındadır.



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

Peletleme yönteminde ise, eriyik cüruf bir vibrasyon plakası üzerine dökülmekte ve bu işlemle genişleyen cüruf, bir miktar su püskürtülerek soğutulmaktadır. Şekil 2.3.'de görüldüğü gibi, buradan da 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 1 m<sup>3</sup>'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, maliyetinin peletleme yönteminden 6 kat daha fazla olması, bu yöntemin kullanımını sınırlandırmaktadır (Newman ve Choo, 2003; Regourd, 1986).



**Şekil 2.3.** Peletleme yönteminin şematik gösterimi (Tokyay ve Erdoğan, 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 süzülmemekte ve cüruflar, bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için de geleneksel çimento öğütme değirmenlerinde çimento inceliğine kadar öğütülmektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları, sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörlerle bir araya getirildiğinde ya da Portland

Çimentosunun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile birleştirildiğinde hidrolik özelliğe sahip olur. Bu özellikleri nedeniyle, öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarını, cürufllu çimentoların üretiminde veya beton yapımında mineral katkı maddesi olarak kullanmak mümkün olmaktadır.

### **2.1.2 Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri**

Cüruflar çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri, elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Örneğin yüksek fırın cüruflarının kendi başlarına bağlayıcılık özelliğinin olmasına karşın, nikel ve bakır cüruflarının yalnızca puzolanik özellikleri vardır (Akçaözoğlu, 2008).

Granüle yüksek fırın cüruflarının hidrolik özelliklerinin belirlenmesindeki önemli parametrelerden birisi de kimyasal kompozisyonlarıdır. Genel olarak, cürufların alkalinitesi ne kadar yüksekse hidrolik özelliğinin de o kadar iyi olduğu kabul edilir. Cürufların kimyasal kompozisyonlarıyla hidrolik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmış olmakla birlikte, kesin ve basit kurallar bulunmuş değildir (Tokyay ve Erdoğan, 1997).

Bir granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik özelliği, belirli bir sınır değere kadar  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  oranının artmasıyla artar. Ancak bu sınır aşıldığında, diğer bir deyişle,  $\text{CaO}$  miktarının çok yüksek olması durumunda granülasyon güçleştiğinden dolayı hidrolik özellikte azalma görülür. Sabit bir  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  oranı için  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarının artması cürufun aktivitesini artırır. Cüruf içindeki demir ve mangan oksitler dayanım özelliklerini olumsuz etkiler. %10'a kadar  $\text{MgO}$  bulunmasının dayanıma olumsuz bir etkisi bulunmaz. Ancak, daha yüksek  $\text{MgO}$  miktarları zararlı etkiler yaratabilir (Tokyay ve Erdoğan, 1997).

### **2.1.3 Yüksek fırın cürufunun hidratasyonu**

Yüksek fırın cüruflarının kendi başlarına suyla reaksiyonu, portland çimentolarının hidratasyonu ile karşılaştırıldığında oldukça yavaş gelişir. Cürufun hidratasyonu cürufun su içinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidratealüminatlar ve hidratesiliko

alüminatların çökmesi olarak tanımlanabilir. Cüruf hidrasyonunun başlangıç aşamasında silikat iyonları eriyiğe geçer, daha sonra, ilk C-S-H çökmesinin ardından, eriyiğin kireç konsantrasyonu artar ve son olarak da alümina konsantrasyonunda, hidratealüminat kristallerinin oluşumuna kadar artış görülür (TÇMB, 2001).

Cürufların beton içerisinde kullanılması, hidrasyon ısısını azaltarak hem maksimum beton sıcaklığını düşürmekte hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır. Ayrıca yüksek fırın cürufu ile birlikte sıcaklık değişim oranı, artan cüruf oranı ile birlikte azalmaktadır. Bu özellik, yüksek sıcaklıkların ortaya çıkmasına engel olduğu için büyük kütle betonlarının dökümünde faydalı olmaktadır. Uygulamada elde edilen sıcaklık azalmaları asıl olarak kesit büyüklüğü, çimento miktarı, cüruf oranı, bağlayıcı bileşenlerin inceliği ve kimyasal kompozisyonu gibi birçok faktöre bağlıdır (Bilim, 2006).

Yüksek fırın cürufllu çimentoların hidrasyon ısılarını araştıran Geiseler vd. (1995)'na göre, yüksek fırın cürufllu çimentolar kimyasal kompozisyonlarından dolayı, aynı mukavemet sınıfındaki diğer çimentolardan daha yavaş ve daha düşük miktarda hidrasyon ısıyı açığa çıkarmaktadır. Hidrasyon ısılarının düşük olması ve ısı gelişimlerinin daha yavaş seyretmesinden dolayı, fazla miktarda cüruf içeriğine sahip olan yüksek fırın cürufllu çimentolar, özellikle temel ve baraj gövdesi gibi büyük hacimli kütle betonlarında kullanılmak için uygun olmaktadır. Hidrasyon ısısının bir sonucu olarak böyle yapıların dış yüzeyi ile göbek kısımları arasında meydana gelen sıcaklık farklılıkları ve buna bağlı olabilecek çatlama riskleri de yüksek fırın cürufu kullanmak sureti ile azaltılabilmektedir (Bilim, 2006).

Katkılı çimentoların hidrasyon ısıları, artan cüruf ikame oranıyla, azalma göstermektedir. Beton içerisine, özellikle %70 gibi yüksek oranlarda cüruf ilavesinin yapılması hidrasyon ısısında dikkate değer düşüşler sağlamaktadır. Fazla miktarda granüle yüksek fırın cürufunun varlığında, katkılı çimento betonlarının hidrasyon ısıları ve basınç mukavemetleri cüruf inceliğinin yükselmesiyle artma eğilimi göstermektedir. Ancak, yüksek fırın cüruflarındaki bu incelik artışı, hidrasyon ısısından ziyade betonun basınç mukavemetini daha çok etkilemektedir. Ayrıca, fazla miktarda yüksek fırın cürufu içeriğine sahip katkılı çimentolarda mukavemet gelişimi  $SO_3$  miktarındaki düşüşle birlikte artmaktadır (Tomisawa vd., 1992).

Yüksek miktarlardaki yer değişim seviyelerinde granüle yüksek fırın cürufu kullanılması, büyük hacimli kütle betonlarının dökümünde meydana gelen yüksek sıcaklıkları ve buna bağlı ortaya çıkabilecek çatlama risklerini en aza indirmekte ve ekonomik açıdan yarar sağlamaktadır (Osborne, 1999). Cürufun hidrasyon hızı ve ortaya çıkan sıcaklık değişimi, Portland çimentosunun hidrasyon hızından daha düşüktür. Bu nedenle, cürufun Portland çimentosuyla kısmi olarak yer değişimi, daha düşük hidrasyon hızına sahip çimento elde edilmesine olanak sağladığından, sonuçta, bu tip bir çimentoyu kullanmak suretiyle üretilen betonun sıcaklık artışı da daha düşük olmaktadır (Soroka, 1993). Alshamsi (1997), beton karışımları içerisinde meydana gelen hidrasyon sıcaklığı üzerinde öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu ve mikrosilikanın etkilerini araştırdığı çalışmada, değişen oranlarda cüruf ve mikrosilika içeren betonların normal Portland çimentosu içeren betonlarla kıyaslamalı olarak hidrasyon ısılarını kaydetmiştir. Çalışmanın sonucunda, hidrasyon sıcaklığındaki artış üzerinde çimento miktarının önemli bir şekilde etkili olduğunun yanı sıra, öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufunun mikrosilikaya göre çimento hamurunda meydana gelen sıcaklık artışını daha fazla azalttığı bildirilmiştir. İlaveten, çimento ile ikame edilen bu malzemelerin pik sıcaklığa erişme süresini kesin olarak etkilediği ve granüle yüksek fırın cürufunun pik sıcaklığa erişim süresini geciktirirken, mikrosilikanın bu süreyi hızlandırdığı da rapor edilmiştir. Cürufu çimento kullanımı hidrasyon ısını azaltarak hem maksimum betonsıcaklığını düşürmekte hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır (Bilim, 2006;Tokyay, 2003).

#### **2.1.4 Yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkisi**

##### **2.1.4.1 Yüksek fırın cürufunun taze beton özelliklerine etkisi**

Aşağıda cürufu çimentolar kullanılarak üretilmiş betonların taze haldeki özellikleri genel hatlarıyla özetlenmiştir.İşlenebilirlik özelliği, yüksek fırın cürufunun, klinkere göre, daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının daha düşük olması, dolayısıyla hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesi cürufu çimentoların betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkileyeceğinin göstergeleridir. Ancak, bu iyileşme çökme deneyi sonuçlarında tam olarak gözlenmez (TÇMB, 2001;Kaya, 2010).

Priz süresi ile zaman içinde işlenebilme kaybı ise cürüflü çimentoların priz sürelerinin portland çimentolarına göre daha uzun olduğu ve dolayısıyla zamanla işlenebilme kaybının daha az olduğu yönündeki genel kaniya karşın düşük sıcaklıklarda priz sürelerinin çok uzadığı, normal sıcaklıklarda ise portland çimentolarıyla bir fark olmadığı saptanmıştır. Aynı şekilde, çökme kaybı konusunda cürüflü çimentolarla portland çimentosu arasında önemli fark bulunmamaktadır (TÇMB, 2001). Terleme, yapılan deneysel çalışmalarda cürüflü çimento kullanılarak üretilmiş betonların hemterleme hızlarının hem de terleme miktarlarının daha fazla olduğu saptanmıştır (TÇMB,2001). Cürüflü çimento kullanımı hidrasyon ısısını azaltarak hem maksimum beton sıcaklığını düşürmekte hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır (Kaya, 2010).

#### **2.1.4.2 Yüksek fırın cürufunun sertleşmiş beton özelliklerine etkisi**

Erken yaşlarda, yüksek fırın cürüflü betonların dayanım değerleri kontrol betonuna göre düşüktür. Bunun sebebi, cüruf katkılı betonların, normal portland çimentosu içeren betonlara göre, dayanım kazanma mekanizmalarının daha yavaş olmasıdır. Çünkü, YFC, reaksiyona girmek için çimentonun reaksiyonu sonucu oluşan  $Ca(OH)_2$  ve neme ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple, YFC'nun hidrasyonu, çimentonun hidrasyonundan daha sonra başlamaktadır. Cüruf yer değiştirme oranı arttıkça, mukavemet gelişim oranı da düşmektedir. Ancak, uygun bir nemli ortam ve uygun bir sıcaklık sağlandığında, cürüflü betonların uzun dönem mukavemeti genel olarak portland çimentosu içeren betonlardan daha yüksek olmaktadır (Brooks vd., 1992; Soroka, 1993). Yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemeler agrega bağlayıcı ara yüzeyinde bulunan boşlukları daha iyi doldurduğundan dolayı, betonun basınç dayanımını artırmaktadır (Türkmen vd., 2002; Akçaözoğlu, 2008).

Eşit çimento miktarı ve eşit su-çimento oranları söz konusu olduğunda cürüflü çimentolar normal portland çimentolarına göre, erken yaşlarda nisbeten düşük, geç yaşlarda ise yüksek beton dayanım değerlerine neden olurlar. Buradan anlaşılacağı gibi, eşdeğer 28 günlük beton dayanımları söz konusu olduğunda beton karışımlarında cürüflü çimento miktarı normal portland çimentosu miktarına göre biraz daha fazla olmalıdır. Bu durumda, geç yaşlardaki dayanımlar cürüflü çimento ile yapılmış dayanımlar için belirtilmiş olan durum Elastisite Modülü için de geçerlidir. Eşit 28 günlük dayanımlar

için, cürüflu çimento kullanılarak yapılmış olan betonların Elastisite Modülleri az bir miktar daha yüksek olmaktadır (TÇMB, 2001). Cürüflu çimentolarla üretilmiş betonların rötreleri konusunda yapılan araştırmaların sonuçları birbirlerinden, deney koşulları ve kullanılan malzemelerin değişik olması nedeniyle, farklılıklar göstermekle birlikte bu farklar çok önemli ölçüde değildir. Genel olarak ifade etmek gerekirse, cürüflu çimento kullanımının rötreyi portland çimentosu kullanıldığı durumlardan daha değişik etkilemediği söylenebilir. Bir diğer özellik olan sünmebetonun davranışıyla ilgili en önemli parametre uygulanan gerilme-dayanım oranıdır. Bu oran sabit olduğu sürece, çimentoların sünme davranışları arasında önemli bir farklılık söz konusu değildir. Betonun bir diğer özelliği olan ısı genleşme ve ısı iletkenlik değerleri ise büyük ölçüde kullanılan agrega tipi ve özelliklerine bağlı olduğundan çimento tipinin önemli bir etkisi söz konusu değildir (Kaya, 2010).

## **2.1.5 Yüksek fırın cürufunun betonun dayanıklılık özelliklerine etkisi**

### **2.1.5.1 Dayanıklılık özellikleri**

Betonun durabilitesi ya da bir başka deyişle dayanıklılığı, hava koşullarından, sülfatlı veya asitli sulardan, betonun kullanıldığı ortam koşullarından kaynaklanan yıpratıcı fiziksel ve kimyasal olaylar karşısında, betonun hizmet süresi boyunca gösterebileceği direnme kabiliyeti ya da daha basit bir tarifile betonun zararlı sıvıların ve gazların difüzyonuna karşı göstereceği direnç olarak tanımlanır. Sülfatlı sular, deniz suları, klorlu sular, karbonatlı sular, termal sular, buz çözücü maddeler vb. ile yapılan uzun süreli deneyler sonucunda iyi kür edilmiş cüruf katkılı betonların performanslarının zararlı kimyasal etkiler altında yüksek olduğu belirlenmiştir (Newman ve Choo, 2003; Tokyay, 2003).

### **2.1.5.2 Permeabilite**

İyi kür edilmiş betonlarda cüruf katkısı, özellikle yüksek sıcaklıklarda, uzun dönem permeabilitesinde faydalı olmaktadır. Bunun muhtemel sebepleri aşağıda verilmiştir;

1. Cürüflu betonlarda 28 gün sonrasında da hidratasyon devam etmektedir.

2. Artan cüruf içeriğiyle, porozitede fazla bir değişim olmamasına rağmen, toplam boşluk dağılımı gittikçe daha ince olmakta ve daha küçük boşlukların miktarı giderek artmaktadır.

3. Artan kür sıcaklığıyla, portland çimentolu betonların boşluk yapısı kabalaşırken, cürufli betonların boşluk yapısı bundan daha az etkilenmektedir.

### **2.1.5.3 Sülfata dayanıklılık**

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren betonların, sadece portland çimentosu içeren betonlara göre sülfat ataklarına karşı daha dayanıklı olduğu kabul edilir. Bu arttırılmış dayanıklılık, yüksek fırın cüruflarının hiç  $C_3A$  içermemesinden dolayı katkılı çimentoların  $C_3A$  içeriklerindeki toplam düşüşle ve permeabilitedeki doğal azalmayla ilişkilidir. Cürufların  $Al_2O_3$  içeriğinin %15'ten daha az olması şartıyla, en az %70 yüksek fırın cürufu içeren çimentoların genel olarak sülfata dayanıklı çimentolarla kıyaslamada göz önüne alınabileceği kabul edilmektedir (Bilim, 2006).

### **2.1.5.4 Donma - çözülme dayanıklılığı**

Benzer mukavemet ve hava içeriğinde, portland çimentolu betonlar ile cüruf katkılı betonların donma-çözülme dirençleri arasında az bir farklılık vardır. Ancak %60 ve daha yukarısı gibi yüksek cüruf ikame oranlarındaki hava katkısız betonlar, portland çimentolarına göre daha düşük bir dayanıklılık sergilemektedirler. Normal şartlarda, betonda yüksek fırın cüruflarının kullanımı, hava sürükleyici katkıların etkinliğine zarar vermemektedir.

### **2.1.5.5 Aşınma dayanıklılığı**

Betonda yüksek fırın cürufu kullanılması, uygun ve yeterli kür uygulanması şartıyla, aşınma dayanıklılığında bir miktar avantaj sağlamaktadır. Ancak, yetersiz kür şartlarından cüruf katkılı betonlar portland çimentolu betonlara göre daha fazla etkilenmiş olsa da tüm betonların aşınma dayanıklılığı önemli bir şekilde azalmaktadır.

### 2.1.5.6 Alkali - silika reaksiyonu

Alkali-silika reaksiyonu, alkali agrega reaksiyonunun en çok bilinen formu olup, bazı agregalarda bulunan silisli mineraller ile çimentodaki alkaliler arasında cereyan eden reaksiyonların bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu reaksiyon, zararlı hacim genleşmelerine ve betonun bozulmasına neden olan su emici kalsiyum silikat jellerini meydana getirir. Bu zararlı hacim genleşmelerini azaltmanın en etkili yollarından biri, betonda yüksek fırın cürufu katkısının kullanılmasıdır (Hobbs, 1982; Newman ve Choo, 2003; Bilim, 2006). Yüksek fırın cüruflarının, bazen oldukça yüksek seviyelerde alkali içermesine rağmen, bunların çözülebilirlikleri portland çimentolarında bulunan alkalilerden daha düşüktür. Alkalilerin boşluk çözeltisindeki alkaliniteye yardım etme ve reaksiyona iştirak mekanizmaları karışık olup hala da tam olarak anlaşılmiş değildir. Alkali-silika reaksiyonunu azaltmak için alınacak tedbirler arasında aşağıda belirtilen yöntemler kullanılabilir:

### 2.1.5.7 Klor geçirgenliği

Cürüflü çimentolar ya da cüruf katkılı betonlar, klor iyonlarının betona girmesine karşı portland çimentolarından daha dayanıklıdır. Bu olumlu etki, klor akışımı azaltıcı etkiye sahip cüruf hidratasyon ürünlerinin klor iyonlarıyla kimyasal olarak birleşmesinden ve aynı zamanda cürüflü çimentoların azalan permeabilitesinden ileri gelmektedir. Ayrıca, bu arttırılmış dayanıklılık, betonarme yapılardaki çeliğin korozyon riskini de azaltma potansiyeline sahiptir.

Klor geçirimliliğinde önemli olan çimentonun klor bağlama kapasitesidir. Yapılan çalışmalardan  $C_3A$ 'nın kloru bağladığı bilinmektedir. portland çimentolarının da cürüflü çimentolardan daha fazla  $C_3A$ 'ya sahip olduğu ve dolayısıyla daha fazla klor iyonu bağlayacağı ve klor iyonu penetrasyonunu azaltacağı düşünülürse de, yapılan çalışmalar bunun aksini ispatlamıştır. Yüksek fırın cürufu içeren çimentolarla yapılan çalışmalarda klor iyonu penetrasyonunun portland çimentolarına göre daha az olduğu görülmüştür. Bunun nedeni C-S-H jelinin daha fazla klor bağlamasıdır. Cürüflü çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan C-S-H, portland çimentosuna göre daha fazla olduğundan, bağlayacağı klor iyonundan dolayı cüruf katkılı betonların klor geçirimliliği de önemli ölçüde azalmaktadır (Onat, 1998).

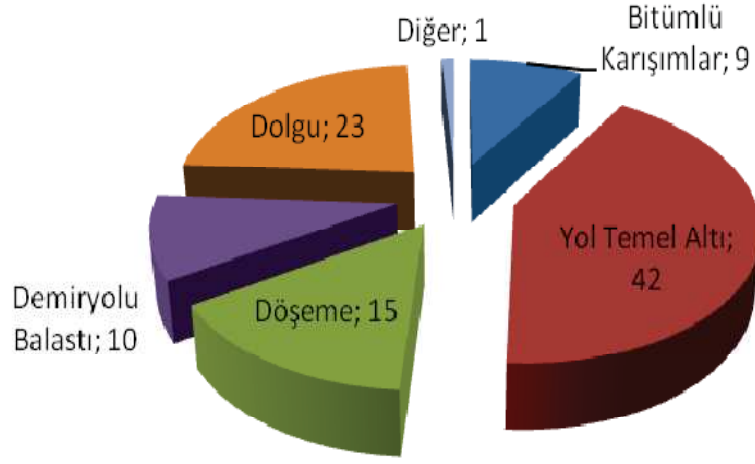
### **2.1.5.8 Karbonatlaşma**

Temiz hava içerisinde normal koşullarda %0,03 şehirleşmenin yoğun olduğu yerlerde ise havada %0,3 kadar karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) bulunmaktadır. Çimentonun hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile havada bulunan karbondioksitin teması halinde kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) oluşmakta ve ayrıca bir miktar su açığa çıkmaktadır. Karbonatlaşma karbondioksitin beton içerisine girmesiyle meydana gelmektedir. Zamanla belirli bir kalınlıkta  $\text{CaCO}_3$  tabakası oluştuğundan sonra  $\text{CO}_2$ 'in beton içerisine girmesi zorlaşır ve bundan dolayı karbonatlaşma hızı yavaşlayarak devam eder. Karbonatlaşmanın gerçekleşme hızı; zamana, betonun geçirimsizliğine, havadaki  $\text{CO}_2$  ve nem miktarına bağlıdır.

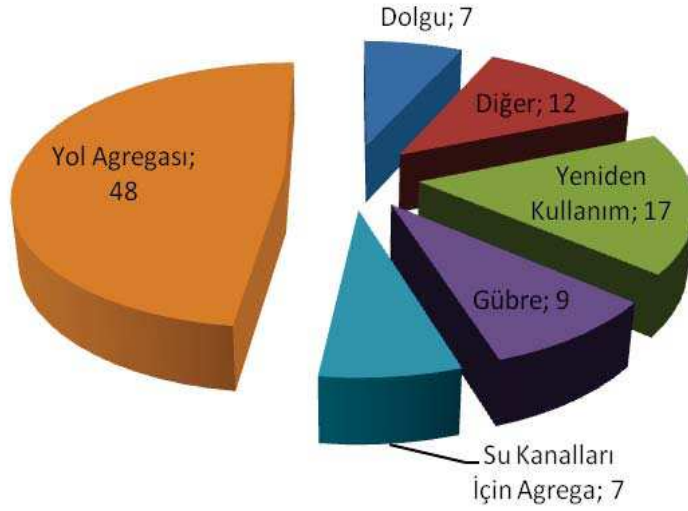
Betonun, çeliği korozyona neden olacak zararlı sülardan koruma yeteneği, pas payı bölgesindeki karbonatlaşmanın mertebesine bağlıdır. Karbonatlaşma üzerinde, yüksek fırın cürufu katkısının etkisi, birçok araştırmanın konusu olmakta ve hala da bu etkiler konusunda bazı tartışmalar yer almaktadır. Bu tartışmaların büyük bir çoğunluğunun sebepleri, yapılan çalışmalarda kullanılan kıyaslamalara temel oluşturan ortam şartlarıyla ve test prosedürleriyle ilişkilidir. Ancak yapılan çalışmalarda hem fikir olunan bir sonuç, cüruf içeren betonların karbonatlaşma direncinin artırılabilmesi için bakım süresinin uzatılması gerektiğidir (Bilim, 2006).

### **2.1.6 Yüksek fırın cüruflarının kullanım alanları**

Cüruf; demiryolu balastı, beton agregası, çimento sanayi, briket ve tuğla yapı, prefabrik, eleman ve blokların yapımı, asfalt agregası, dolgu malzemesi, beton agregası, demiryolu, yalıtım, cam üretimi, yem sanayi, tarım ve çevre uygulamaları gibi geniş bir alanda kullanılabilir. Cürufu etkin şekilde kullanan Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'nın cürufu hangi oranlarda nerelerde kullandıkları Şekil 2.4. ve Şekil 2.5.'de verilmiştir (Belli, 1975; Güner, 1993; Atanur, 1983; Erdoğan, 1993).



**Şekil 2.4.** Cürufun kullanım alanları (Amerika Birleşik Devletleri)



**Şekil 2.5.** Cürufun kullanım alanları (Kanada)

Yüksek fırın cürufunun doğrudan kullanıldığı alanlarına bakacak olursak, beton agregası, hafif beton yapımı, hafif dolgu malzemesi ve yalıtım gibi inşaat dallarında kullanıldığı görülebilir. Yüksek fırın cürufunun öğütülmüş olarak kullanım alanları ise, çimento yapımı, cam sanayi, harç enjeksiyonu ve zemin stabilizasyonu gibi alanlarda kullanıldığı karşımıza çıkmaktadır (Bilgen vd., 2010).

Özellikle YFC çok aranan ve çok iyi derecede verim alınabilen bir malzemedir. Yüksek durağanlık, geçirimsizlik, yüksek mukavemet, ateşe dayanıklılık, ekstra sertlik, yalıtkanlık, hafiflik özelliklerinden dolayı tercih edilir. Taze betondaki işlenebilmeyi artırmaktadır, terlemeyi azaltmaktadır. Hidratasyon ısısını azaltarak, priz süresini uzatmaktadır. Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır ve sülfata dayanıklılığını artırmaktadır (Beycioğlu vd., 2008 ).

#### **2.1.6.1 Yüksek fırın cüruflarının inşaat sektöründe kullanım alanları**

##### **2.1.6.1.1 Hafif beton agregası olarak kullanımı**

Kontrollü miktarda su ile soğutulan ve içerisinde buhar hapsolmesi nedeniyle, genişlemeye uğrayarak gözenekli bir yapıya kavuşan cüruflar, kırıldıkları takdirde hafif agrega olarak, hafif beton yapımında kullanılabilir. Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu agregalarının özgül ağırlığı, normal agregalarınkinden daha düşüktür. Bunun yanında, ısı yalıtımı, işleme kolaylığı, ateşe ve donmaya karşı dayanıklılık özellikleri de vardır. Bu avantajlarıyla, yapı türüne göre toplam maliyette %10-15 oranında tasarruf sağlanabilmektedir (Çevik, 1993; Güner, 1993).

##### **2.1.6.1.2 Yol malzemesi ve asfalt betonu agregası olarak kullanımı**

Üretimi sonrası havada soğutulmuş cüruflar, içerdikleri kristal yapı nedeniyle hidrolik bir bağlayıcılık değerine sahip olmadıklarından, kırılmaları durumunda, temel stabilizasyonu, dolgu, asfalt betonu agregası, buzlanmada kaymayı önleyici kum, demiryolu balastı, yol temel altı ve temel malzemesi gibi birçok yerde kullanılmaktadır (Bilim, 2006).

##### **2.1.6.1.3 Katkılı çimento ve beton üretiminde kullanımı**

Öğütülmüş durumda puzolanik özellik gösteren granüle yüksek fırın cüruflarının bağlayıcılık özelliklerinden iki şekilde yararlanılmaktadır:

- Portland çimentosu üretiminde kullanılan klinker, bir miktar azaltılarak yerine granüle yüksek fırın cürufu konulmaktadır. Klinker ve cüruf, bir miktar da alçıtaşı birlikte öğütülerek cürüflü çimentolar elde edilmektedir.
- Beton içerisinde bağlayıcı madde olarak kullanılan Portland çimentosu bir miktar azaltılarak yerine çok ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu katılmakta ve katkılı beton elde edilmektedir (Erdoğan, 1993).

#### **2.1.6.1.4 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun cürüflü çimento üretiminde kullanımı**

Cürüflü portland çimentolarının üretimi genellikle, granüle yüksek fırın cürufunun küçük bir miktar alçıtaşı ve portland çimentosu klinkeri ile birlikte öğütülmesiyle gerçekleştirilmektedir.

Cürüflü portland çimentolarının üretiminde kullanılacak granüle yüksek fırın cürufunun uygun özellikte olması gerekmektedir. Ancak Türk Standartları da dahil, bazı standartlarda, cürüflü çimento üretimi için kullanılacak granüle yüksek fırın cürufunun özellikleri belirtilmemektedir. Bu nedenle, önceleri, çimento üretimi için kullanılacak cürufun uygunluğu,  $CaO+MgO+Al_2O_3/SiO_2 > 1$  koşulu olarak göz önünde tutulmuş, son yıllarda ise, cüruf-aktivite indeksinin tayin edilerek cüruf özelliklerinin uygunluğunun araştırılması ağırlık kazanmıştır. ASTM C 595 (1993)'e göre, cürüflü çimentoların üretiminde kullanılacak granüle yüksek fırın cürufunun aktivite indeksi, 28 günlük numuneler için, en az %75 olmalıdır (Erdoğan, 1995).

#### **2.1.6.1.5 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton yapımında mineral katkı olarak kullanımı**

Cürüflü betonlar, portland çimentosunun bir miktarının azaltılıp, yerine öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun katılması ile elde edilir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılmasının sağladığı bir takım yararlar vardır. Erdoğan (2003) bu yararları aşağıda ki gibi sıralanmaktadır.

1. Ayrı öğütme, tanelerin istenilen inceliğe getirilmesinde büyük randıman sağlamaktadır. Granüle yüksek fırın cürufu, portland çimentosu klinkerinden daha

sert bir malzemedir. Cürüflu çimento üretimi için cüruf ve klinker birlikte öğütülmeye tabi tutulduğunda, klinker daha ince taneli, cüruf ise daha kalın taneli bir durum kazanmaktadır. Klinkerle birlikte öğütülen cürufu optimum inceliğe getirebilmek zordur.

2. Ayrı öğütülme işlemi, üretilen malzemenin daha iyi kontrol altında tutulmasını sağlamaktadır. Farklı kaynaklardan elde edilen cüruflar değişik sertliğe ve öğütülme kapasitelerine sahiptir. Cürufun ayrı öğütülmeye tabi tutulmasıyla, istenilen incelikte cüruf elde edilebilmektedir.
3. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun depolanma özelliği, cürüflu çimentonun depolanma özelliğinden daha iyidir. Cürüflu çimento depolanma esnasında nem aldığı takdirde veya depoda uzun süre tutulduğunda, prehidratasyon ve karbonatlaşma göstermekte, bağlayıcılık özelliği azalmaktadır. Cürufların depolanmasında bu tür sorunlar yoktur.
4. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, değişik koşullarda kullanılacak beton karışımlarının hazırlanmasına da esneklik getirmektedir. Beton katkı maddesi olarak kullanılacak cürufu, istenilen inceliğe kadar öğüterek ve istenilen miktarda kullanarak, arzu edilen kalitede beton karışımı elde edebilmek mümkündür.
5. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun katkı maddesi olarak kullanılması, taze betonun işlenebilmesini arttırmaktadır. O nedenle, belirli bir kıvam için gerekli olan karışım suyu ihtiyacı azalacağından dayanım artmakta, büzülme ise azalmaktadır (Elibol, 2012).

## **2.2 Alkalilerle Aktive Edilen Yüksek Fırın Cürüflu Betonlar**

### **2.2.1. Alkaliler**

Portland çimentosu kullanılmadan bir bağlayıcı üretimine yönelik çalışmalardan en ilgi çekeni, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların alkalilerle aktivasyonudur.

Teorik olarak silika ve alümina içeren her malzeme alkalilerle aktive edilebilir. Günümüze kadar yapılan araştırmalarda kaolinitik killeri, metakaolin, uçucu kül, kırmızı çamur, zeolit gibi malzemelerin aktivasyonunda en yaygın olarak kullanılan aktivatörler, sodyum veya potasyum hidroksit (POH, NaOH) ile cam suyu ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) veya potasyum cam suyu ( $\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$ ) karışımıdır (Baradan vd., 2012). Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, normal portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek mekanik dayanım (Bernal ve Al, 2011), daha düşük hidratasyon ısı ve agresif kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gibi bazı önemli avantajlara sahiptir. Bunun yanında ani priz, mikro çatlak oluşumu ile yüksek büzülme ve çiçeklenme gibi bazı dezavantajları vardır (Baradan vd., 2012). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi amorf karakterli malzemeler bir aktivatör vasıtasıyla aktive edilerek bir bağlayıcıya dönüştürülebilmektedir. Alüminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda “geopolimer” adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu sonucunda çimento esaslı bağlayıcılardaki C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır (Aydın, 2010). Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, normal portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek mekanik dayanım, daha düşük hidratasyon ısı ve agresif kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gibi bazı önemli avantajlara sahiptir. Bunun yanında, ani priz, mikro çatlak oluşumu ile yüksek büzülme ve çiçeklenme gibi bazı dezavantajları vardır (Aydın, 2010). Ani prizi önlemek için yapılan bazı çalışmalarda fosforik veya malik asit kullanılmıştır (Özodabaş, 2014).

Alkalileri 6 grupta inceleyebiliriz ;

1. Kostik alkaliler
2. Zayıf asitli tuzlar
3. Silikatlar
4. Alüminatlar
5. Alüminosilikatlar
6. Güçlü asitli tuzlar

En çok kullanılan alkaliler; sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum sülfat ve sodyum silikattır. Sodyum karbonat ve sodyum sülfat doğal kaynaklardan elde edilir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit ise sadece üretilerek elde edilir (Cajun vd., 2006;Özodabaş, 2014).

### **2.2.1.1 Sodyum hidroksit**

Sodyum hidroksit, kostik soda olarak da bilinen, çok kuvvetli bir bazdır. Moleküler formülasyonu NaOH'tır. Sodyum hidroksit endüstri malzemesi olarak; kağıt üretimi, temizlik malzemesi, sabun üretimi, gıda sektörü, metal işleme, tarımsal ilaçlar, boya üretimi, tekstil vb. bir çok alanda kullanılır. 2004'te dünya çapında yıllık sodyum hidroksit talebi elli bir milyon ton, üretimi ise altmış milyon tondur (Kurt ve Bittner, 2005;Elibol, 2012).

#### **2.2.1.1.1 Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri**

Sodyum hidroksit katı formda ve beyaz renklidir. Suda çok iyi çözünürler. Oda sıcaklığında 111 gr/100 ml çözelti elde etmek mümkündür. Bunun yanında etanol ve metanol çözeltileri de mümkündür. Suda çözünmemiş katı halde sodyum hidroksitin 20°C'de özkütlesi 2,13 gr/cm<sup>3</sup>'tür. Erime sıcaklığı 318°C ve kaynama sıcaklığı 1388°C'dir. Molar kütlesi ise 39,9971 gr/mol'dür.

Doğun çözeltilerinde altı farklı hidrat formu vardır; NaOH.H<sub>2</sub>O, NaOH.2H<sub>2</sub>O, NaOH.3,5H<sub>2</sub>O, NaOH.4H<sub>2</sub>O, NaOH.5H<sub>2</sub>O ve NaOH.7H<sub>2</sub>O. Çözeltide ki su azaldıkça NaOH konsantrasyonu artmaktadır. Sodyum hidroksitin çözünmesi sırasında yüksek miktarda ısı meydana gelir, ısının artmasıyla beraber NaOH konsantrasyonu da artmaktadır. Sıcaklığın artması NaOH çözeltisinin viskozitesini bir miktar azaltacaktır. (Shivevd., 2006;Elibol, 2012).

#### **2.2.1.2 Sodyum silikat**

Sodyum silikat su camı veya cam suyu (çözünür cam) olarak da bilinir. Moleküler formülasyonu Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'tür. Sodyum silikatlar genel olarak üretildikleri aside göre; ortosilikat, metasilikat, disilikat ve tetrasilikat olarak adlandırılırlar. Ayrıca kristal yapısına göre bir X-Ray kırınım metoduna göre de sınıflandırılabilirler. Bütün bu bileşikler renksiz, transparan, camsı madde ve su içerisinde viskoz bir çözelti olarak mevcuttur. Çözeltileri kuvvetli alkalilerdir. Sodyum silikatlar endüstride; temizlik malzemelerinin üretiminde, tekstil sanayinde, kağıt üretiminde, seramik sanayinde, mürekkep üretiminde, otomotiv sektöründe vb. alanlarda kullanılır (Elibol, 2012).

## 2.2.2 AA-YFC bağlayıcı betonlar

Alkalilerle aktive edilen cürüflü betonlar, bağlayıcı madde olarak portland çimentosunun (PÇ) yerine, alkalilerle aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürüflerinin beton içerisinde kullanılması suretiyle elde edilmektedir (Collins ve Sanjavan, 2001).

Alkalilerle aktive (AA) edilmiş YFC kullanıldığında beton dayanımları 90 günde 60 MPa'a kadar ulaşabilmekte, çökme kaybı ise normal portland çimentosundan daha fazla olmaktadır. Elastisite modülü azalmakta, sünme ise artmaktadır. Beton dayanımı ve işlenebilirliği kullanılan alkali kombinasyonuna bağlı olarak değişim göstermektedir. Betonda alkalilerle aktive edilmiş YFC kullanıldığında kuruma rötresi artmaktadır. Yüksek sıcaklıkta kür edildiği takdirde rötre azalmaktadır. Alkalilerle aktive edilmiş YFC'li (AA-YFC) betonlarda gözenek fazla olmasına karşın boyutları küçüktür (Collins ve Sanjavan,2001;Karizan ve Zivanovic, 2002). Roy ve Idorn, Portland çimentolu betonlarla kıyaslandığında, alkalilerle aktive edilmiş cürüflü betonların, düşük hidratasyon ısısına, yüksek erken mukavemete ve agresif çevre koşullarında daha üstün durabiliteye sahip olduğunu bildirmiştir.

Bu tip bağlayıcıların kullanımı, endüstriyel atıkların değerlendirilmesinden dolayı portland çimentolarına kıyasla önemli ekonomik ve çevresel avantajlar sunmaktadır. 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). Aktivatörün etkinliği birçok faktöre bağlı olup; tipi, dozajı, ortam sıcaklığı ve su/YFC oranı en önemli olanlarıdır (Bakarev vd., 1999 a ).

### 2.2.2.1 AA-YFC bağlayıcı betonların avantajları

Alkali aktivatörlü bağlayıcılarla üretilen betonlar, portland çimentolu (PÇ) betonlara kıyasla önemli teknik avantajlara da 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. Ayrıca, düşük üretim maliyeti, enerjinin verimli kullanımı ve çevre dostu olması da önemli özelliklerindedir (Bakarev vd., 1999 b).

#### **2.2.2.2 AA-YFC bağlayıcılı betonların dezavantajları**

Alkali aktivatörlü bağlayıcıların hızlı priz, yüksek büzülme, ilerleyen dönemlerde mikro çatlak oluşumu, çiçeklenme gibi dezavantajları vardır. Ayrıca, bazı araştırmalarda bu bağlayıcıların alkali-agrega reaksiyonu nedeniyle genleşme oluşturabilmesi olasılığının daha fazla olduğunu ileri sürülmektedir (Zivica, 2006; Fernandez vd., 1999).

#### **2.2.2.3 AA-YFC bağlayıcılı betonların tarihsel gelişimi**

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar keşfedildikten sonra (1958), eski Sovyetler birliği, Çin ve bazı diğer ülkelerde ticari olarak üretilmiş ve çeşitli inşaat uygulamalarında kullanılmıştır. 1999-2000 yıllarında Ukrayna’da alkalilerle aktive edilmiş YFC betonu ile inşa edilmiş beton yapılar incelendiğinde tüm AAC betonlarının hala iyi performansa sahip olduğu ve aynı bölgede PÇ ile yapılan betonların performansını aştığı görülmüştür. Bu yapılardan alınan örnekler üzerinde yapılan mikro yapı incelemeleri ve performans deneyleri, bu betonların performanslarının kullanılan hammaddeye, servis koşullarına ve yaşa bağlı olduğunu göstermiştir (Shi vd., 2006 b).

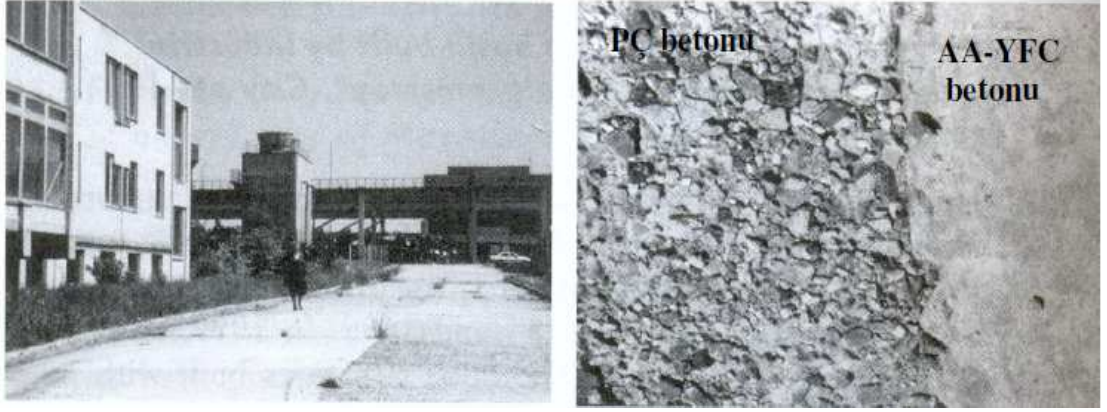
1986-1994 yılları arasında “Tsentrmetallur gremont” sanayi şirketi AA-YFC betonlarından çeşitli çok katlı konut inşaatları yapmıştır. Şekil 2.6’da görülen, Rusya’nın Lipetsk şehrindeki 16, 20 ve 24 katlı üç çok katlı bina 2000 yılında incelenmiştir. Bu üç binanın dış duvarları yerinde dökme AA-YFC betondur. Kat döşemeleri, merdivenler ve diğer kısımları ise prefabrike AA-YFC betondur. YFC dozajı  $450 \text{ kg/m}^3$  olup, aktivatör olarak soda çözeltisi kullanılmıştır. Betonların proje dayanımı 25 MPa’dır. 2000 yılında yapılan incelemeler, dayanım açısından proje dayanımının aşıldığını, beton yüzeyinde çatlama ve bozulmanın oluşmadığını göstermiştir (Shi vd., 2006 b).



**Şekil 2.6.** AA-YFC betonu ile inşa edilmiş bina (Shi ve ark., 2006 b).

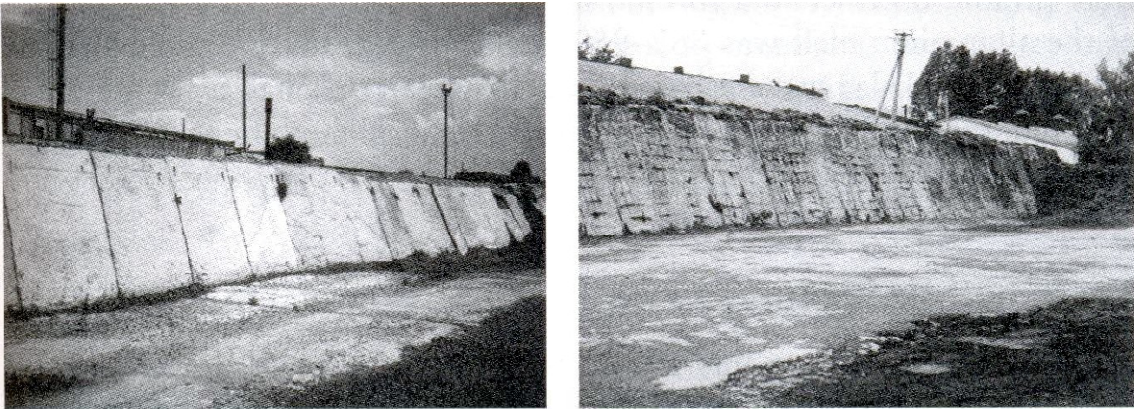
1974 yılında Polonya'nın Krakow şehrinde, duvar panelleri ve kat döşemeleri AA-YFC betonundan imal edilmiş bir depo yapısı imal edilmiştir. Aktivatör olarak  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  kullanılmıştır. YFC dozajı ise  $300 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Prefabrik olarak üretilen elemanlar  $70^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 6 saat süreyle kür edilmiştir. Binanın dış kısmındaki panel elemanlardan alınan karotlar üzerinde yapılan deneyler; basınç dayanımının 28. günde 23 MPa, 27 yılda ise 43 MPa olduğunu göstermiştir. Karbonatlaşma derinliği ise 27 yılda 11 mm olarak bulunmuştur. 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 b).

Şekil 2.7.'ye baktığımızda Ternopol şehrinde endüstriyel bir bölgede 1984-1990 yılları arasında AA-YFC betonu ile yapılmış yollar görülmektedir. 1999 yılında aynı bölgede ve aynı yıllarda yapılan PÇ betonu ile AA-YFC betonları karşılaştırılmıştır. AA-YFC betonları gayet iyi durumdayken, PÇ betonlarının ciddi şekilde hasar gördüğü görülmüştür.



**Şekil 2.7.** AA-YFC ve PÇ betonu ile üretilmiş yollar (Shi ve ark., 2006 b).

Şekil 2.8.'de ise 1982 yılında Ukrayna'da çiftçilerin kullandıkları yem depolarının inşasında AA-YFC betonları kullanılmıştır. Betonarme panel elemanlardan oluşan bu yapıda AA-YFC betonu kullanılmıştır. Aktivatör olarak, soda-potasyum çözeltisi kullanılmıştır. Dizayn dayanımı 30 MPa olan yapıdan 18 yıl sonra alınan numuneler üzerinde yapılan deneyler dayanım değerinin 39 MPa olduğunu göstermiştir. Yemlerin fermantasyonu kuvvetli organik asitlerin oluşumuna neden olarak betonun bozulmasına yol açmaktadır. Aynı zamanda, araç trafiği panel elemanlar üzerinde dinamik yüklere neden olmaktadır. AA-YFC betonlarından üretilen panellerde 18 yıl sonra herhangi bir bozulma oluşmazken, PÇ betonlarıyla üretilen panellerde betonda bozulma ve donatıda paslanma oluşmuştur.



**Şekil 2.8.** AA-YFC ve PÇ betonu ile üretilmiş paneller (Shi vd.,2006 b).

## 2.3 Hidratasyon Isısı

Bağlayıcı maddeler priz ve sertleşme esnasında bir miktar ısı açığa çıkarırlar ki buna hidratasyon ısısı denir. Bu ısı doğrudan çimentoyu oluşturan karmaşık bileşimlerin su ile yapmış oldukları kimyasal reaksiyonda veya hidratasyonda meydana gelmektedir. Hidratasyon olayının uzun sürmesi sonunda ısı da uzun müddet meydana gelmekte veya açığa çıkan ısının toplam miktarı senelerce artmaya devam etmektedir. Hidratasyonun ekzotermik davranışı pek çok sakıncalara neden olur. Priz ve sertleşme esnasında meydana gelen ısı sonunda betonun sıcaklık derecesi artar. Betonun sıcaklık derecesinin artması ile yapılarda çatlakların meydana gelmesine neden olur (Nebioğulları, 2010).

### 2.3.1 Betonda hidratasyon ısısı

Çimentonun su ile yapmış olduğu kimyasal reaksiyona hidratasyon denir. Ancak, bu reaksiyon çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Çimento-su arasındaki reaksiyon başlangıçta her bir bileşenin tek başına suyla reaksiyonu olarak açıklanabilir. Çimento hidratasyonunu çimentonun teması, çimentonun tüm reaktif fazlarda çeşitli iyonlar suya geçerek eriyebildikleri düşük hidrate bileşenler oluşur. Bu bileşenler daha önce su ile dolu olan boşlukları doldurarak poroziteyi azaltır.

Betonda basınç dayanımının niteliği kendisine ait diğer tüm mekaniksel özelliklerini doğrudan etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle betonda basınç dayanımı, betonun sınıflandırılması ve tanımlanmasında esas alınan bir kıstas olarak kabul edilmektedir. Beton üretiminde öngörülen amaç basınç dayanımını, betonun sertleşme sürecindeki hidratasyon olayının tamamlanması ile doğrudan ilişkilidir. Betonda hidratasyon olayının tamamlanması için gerekli olan unsurlar; karışıma giren su miktarını karakterize eden w/c oranı, betonun prizini aldıktan sonra kür şartlarının gerçekleşebilme durumuna büyük ölçüde bağlı olduğu bilinmektedir. Yüksek hidratasyon ısısının betonun basınç dayanımını olumsuz yönde etkilememesi için çoğu kez, beton üretiminde kullanılan çimentonun hidratasyon ısısını düşürme çabaları üretim sırasında ön plana çıkartılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda çimentoya puzolanik katkı maddeleri katılmakta ve böylece çimentonun hidratasyon ısısının düşürülmesi sağlanmaktadır.

Çimentonun hidratasyonu dıştan merkeze doğru gelişir ve sürekli hidratasyon hızında azalma görülür. Ancak uzun zaman geçmesine rağmen çimento tanesinin büyük bir kısmı hidrate olmayabilir. Mesela, 28 günlük su ile temas halindeki bir çimento tanesinin ancak 4µm derinliğe kadar hidrate olduğu ve bir sene sonra 8 µm kenardan tane içine suyun nüfuz ettiği yapılan son çalışmalarda belirlenmiştir. Power, 50 mikronun altındaki tanelerin ancak tamamen hidrate olabileceğini belirtmektedir.

Hidratasyonun ekzotermik davranışı pek çok sakıncalara neden olur. Priz ve sertleşme esnasında meydana gelen ısı sonunda betonun sıcaklık derecesi artar. Betonun sıcaklık derecesinin artması ile yapılarda çatlakların meydana gelmesine neden olur. Özellikle baraj gibi büyük kütle betonlarının üretiminde süratli bir şekilde beton döküldüğünden büyük kütle halindeki betonun iç sıcaklığı yükselir, hava ile temasta olan dış kısım soğur ve büzülür. Büyük kütle dış kısmın büzülmesini önler, beton çatlak ve su geçirimli bir malzeme üretilmiş olur. Barajlarda geçirimsizliğin ne kadar önemli olacağı ise açıktır. Hidratasyonun ısisının yol açtığı bu olayların nedeni “Termik rötne” dediğimiz olaydır. Hidratasyon ısisının yayılımı ve bunun sonucunda kütledeki sıcaklık değişimi aşağıdaki gibi gösterilebilir (Nebioğulları, 2010).

### **2.3.2 Yüksek fırın cürufunun hidratasyonu**

Yüksek fırın cüruflarının kendi başlarına suyla reaksiyonu, Portland çimentolarının hidratasyonu ile karşılaştırıldığında oldukça yavaş gelişir. Cürufun hidratasyonu cürufun su içinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidrate alüminatlar ve hidratesiliko alüminatların çökmesi olarak tanımlanabilir. Cüruf hidratasyonunun başlangıç aşamasında silikat iyonları eriyiğe geçer, daha sonra, ilk C-S-H çökmesinin ardından, eriyiğin kireç konsantrasyonu artar ve son olarak da alümina konsantrasyonunda, hidratealüminat kristallerinin oluşumuna kadar artış görülür (Kaya, 2010).

### **2.3.3 Yüksek fırın cürufunun hidratasyona etkisi**

Yüksek fırın cüruflu çimentoların hidratasyon ısılarını araştıran Geiseler vd. (1995)'ne göre, yüksek fırın cüruflu çimentolar kimyasal kompozisyonlarından dolayı, aynı mukavemet sınıfındaki diğer çimentolardan daha yavaş ve daha düşük miktarda hidratasyon ısisı açığa çıkarmaktadır (Geiseler, 1995).

Katkılı çimentoların hidrasyon ısıları, artan cüruf ikame oranıyla, azalma göstermektedir. Beton içerisine, özellikle %70 gibi yüksek oranlarda cüruf ilavesinin yapılması hidrasyon ısısında dikkate değer düşüşler sağlamaktadır. Fazla miktarda granüle yüksek fırın cürufunun varlığında, katkılı çimento betonlarının hidrasyon ısıları ve basınç mukavemetleri cüruf inceliğinin yükselmesiyle artma eğilimi göstermektedir. Ancak, yüksek fırın cüruflarındaki bu incelik artışı, hidrasyon ısısından ziyade betonun basınç mukavemetini daha çok etkilemektedir. Yüksek miktarlardaki yer değişim seviyelerinde granüle yüksek fırın cürufu kullanılması, büyük hacimli kütle betonlarının dökümünde meydana gelen yüksek sıcaklıkları ve buna bağlı ortaya çıkabilecek çatlama risklerini en aza indirmekte ve ekonomik açıdan yarar sağlamaktadır (Bilim, 2006).

Cürufun hidrasyon hızı ve ortaya çıkan sıcaklık değişimi, portland çimentosunun hidrasyon hızından daha düşüktür. Bu nedenle, cürufun portland çimentosuyla kısmi olarak yer değişimi, daha düşük hidrasyon hızına sahip çimento elde edilmesine olanak sağladığından, sonuçta, bu tip bir çimentoyu kullanmak suretiyle üretilen betonun sıcaklık artışı da daha düşük olmaktadır (Soroka,1993). Alshamsi (1997), beton karışımları içerisinde meydana gelen hidrasyon sıcaklığı üzerinde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve mikrosilikanın etkilerini araştırdığı çalışmasında, değişen oranlarda cüruf ve mikrosilika içeren betonların normal portland çimentosu içeren betonlarla kıyaslamalı olarak hidrasyon ısılarını kaydetmiştir. Çalışmanın sonucunda, hidrasyon sıcaklığındaki artış üzerinde çimento miktarının önemli bir şekilde etkili olduğunun yanı sıra, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun mikrosilikaya göre çimento hamurunda meydana gelen sıcaklık artışını daha fazla azalttığı bildirilmiştir. İlaveten, çimento ile ikame edilen bu malzemelerin pik sıcaklığa erişme süresini kesin olarak etkilediği ve granüle yüksek fırın cürufunun pik sıcaklığa erişim süresini geciktirirken, mikrosilikanın bu süreyi hızlandırdığı da rapor edilmiştir (Alshamsi, 1997). Cürufllu çimento kullanımı hidrasyon ısısını azaltarak hem maksimum beton sıcaklığını düşürmekte hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır (Tokay, 2003).

## BÖLÜM III

### MATERYAL VE METOD

#### 3.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi, fiziksel özellikleri ile beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarlarının tespitinde kullanılan yöntemler verilmektedir.

##### 3.1.1 Çimento

Bu çalışmada, Niğde ÇİMSA Çimento Fabrikası tarafından üretilen, TS EN 197-1 (2012) ile uyumlu CEM I 42,5 R ve CEM II/ A-M (P-L) 42.5 R olmak üzere iki tip portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun taze olarak kullanılmasına özen gösterilmiş ve nem almayacak şekilde koruyucu kaplarda korunmuştur. Kullanılan çimentoya ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1.'de, fiziksel özellikler ise Çizelge 3.2.'de verilmiştir. Bu değerler ÇİMSA Niğde Çimento Fabrikası'ndan alınmıştır.

**Çizelge 3.1.** Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal analiz	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Cl	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	K.K
CEM I (%)	19.29	5.25	2.88	61.47	2.88	0.013	2.65	0.43	0.77	3.45
CEM II (%)	19.73	4.87	3.23	60.1	2.83	0.012	2.79	0.41	0.77	3.41

**Çizelge 3.2.** Kullanılan çimentoların fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler			CEM I	CEM II
Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )			3.11	3.08
İncelik	Özgül Yüzey(cm <sup>2</sup> /gr)		3050	3780
	Su İhtiyacı(%)		28.4	28.7
	0.090 mm elek kalıntısı(%)		0.81	0.85
Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) 7 günlük			37.6	37
Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) 28 günlük			48.9	47.4

### 3.1.2 Yüksek fırın cürufu

Çalışmada İskenderun Demir Çelik Fabrikası'nın atığı olan ve OYSA İskenderun Çimento Fabrikası'nda belli bir incelik değerine kadar öğütülen Yüksek fırın cürufu bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Cürufun özgül ağırlığı 2.82 gr/cm<sup>3</sup>, Blaine özgül yüzeyi 4350 cm<sup>2</sup>/g'dır. ASTM C 989 (ASTM C 989 1994) uygun olarak hesaplanan cüruf aktivite indeksleri 7. gün için %65; 28. gün için ise %85,5 bulunmuştur. Kullanılan cürufun kimyasal özellikleri Çizelge 3.3.'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu (%)

Oksit	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
YFC	35,60	15,30	0,98	33,41	9,5	0,99	0,66	0,52

### 3.1.3 Aktivatörler

Yüksek fırın cürufu bağlayıcılı betonlarda, kullanılan yüksek fırın cüruflarının aktivasyonu, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat çözeltisi (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ile yapılmıştır. Kullanılan aktivatörlerin özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

### 3.1.3.1 Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

Yüksek fırın cürufunu aktive etmek için cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) KİMETSAN kimya firmasından temin edilmiştir. Fotoğraf 3.1.'de görülen sodyum silikat suda çözünen bir cam türüdür, yüksek erime noktasına sahiptir. Başta seramik olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır.



**Fotoğraf 3.1.** Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

### 3.1.3.2 Sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ )

Yüksek fırın cürufunu aktive etmek için kullanılan bir başka aktivatör olan sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) ise MERCK kimya firmasından temin edilmiştir. Fotoğraf 3.2.'de verilen sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) için molekül ağırlıkları sırasıyla 40 gr/mol ve 105.99 gr/mol olup, kimyasal özellikleri Çizelge 3.4.'te ayrıntılı olarak verilmiştir. Piyasada kostik olarak da bilinen sodyum hidroksit ucuz ve kolay temin edilebilen bir aktivatördür. Beyaz renkli ve katı halde olan sodyum hidroksit 320 °C'de erir, akkor derecede uçucudur, suda ısı yayarak çözünür ve nem kaparak bozunur.



**Fotoğraf 3.2.** Sodyum hidroksit (NaOH)

**Çizelge 3.4.** Sodyum hidroksitin kimyasal kompozisyonu(%)

Asidimetrik	$\geq 97$
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	$\leq 1$
Cl	$\leq 0.01$
SO <sub>4</sub>	$\leq 0.01$
Pb	$\leq 0.002$
Al	$\leq 0.002$
Fe	$\leq 0.002$

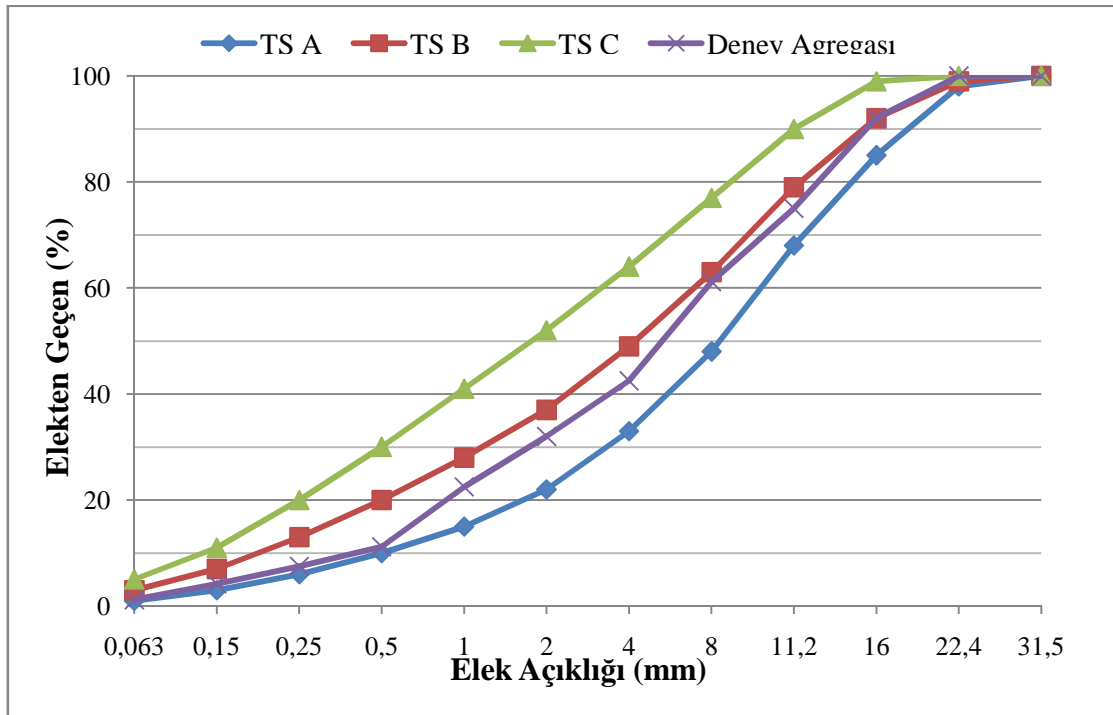
### 3.1.4 Agregat

Deneysel çalışmalarda, ince agregat olarak Nevşehir ili, Kızılırmak üzerindeki kum ocaklarından temin edilen dere kumu kullanılmıştır. Kaba agregat olarak ise Niğde Başmakçı Bölgesi'nden elde edilen kalker esaslı kırma taş agregat kullanılmıştır. Beton karışımında kullanılan agregatın maksimum tane çapı 16 mm'dir. Agregatın su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı TS EN 1097-6 (2002)'ya göre bulunmuş olup, ince ve iri agregatın özgül ağırlıkları sırasıyla 2.45 gr/cm<sup>3</sup> ve 2.71 gr/cm<sup>3</sup>'dür. İnce ve iri agregatın su emme kapasiteleri % 2.5 ve % 0.8'dir.

Karışımında kullanılan betona ait agregatın elekten geçen miktarları ve TS 706 EN 12620 (2009)'da belirtilen en büyük tane çapı 16 mm olan agregatın sınır değerleri Çizelge 3.5.'te, bunlara ait granülometri eğrileri ise Şekil 3.1.'de verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Beton karışımında kullanılan agreganın eleklerden geçen miktarları

Elek açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)			Kullanılan agrega
	TS 706 EN 12620+A1 alt limit	TS 706 EN 12620+A1 orta limit	TS 706 EN 12620+A1 üstlimit	
31.5	100	100	100	100
22.4	98	99	100	100
16	85	92	99	92.1
11.2	68	79	90	75.0
8	48	63	77	61.2
4	33	49	64	42.5
2	22	37	52	32.0
1	15	28	41	22.5
0.5	10	20	30	11.2
0.25	6	13	20	7.5
0.15	3	7	11	4.2
0.063	1	3	5	1.2



**Şekil 3.1.** Çalışmada kullanılan betona ait agreganın granülometri eğrisi

### 3.1.5 Karışım suyu

Su betonun içerisinde iki önemli görev üstlenmektedir. Bunlardan birincisi; çimento ile birleşerek hidrasyonun (çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların) yer

almasını sağlamak, ikincisi ise, betonun karılma işleminde agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak taze beton karışımında istenilen işlenebilmeyi sağlamaktır. Ayrıca kür suyu olarak, yerine yerleştirilmiş olan betonun yüzeyini ıslak tutup içerisindeki suyun buharlaşmasını önlemek, böylece, betonun içerisinde kimyasal reaksiyonların gelişebilmesi için yeterli miktarda suyun bulunmasını sağlamak gibi bir görevi daha vardır. Beton üretiminde kullanılacak karışım suyunun kalitesi ve miktarı betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Kür suyunun kalitesi, beton karışımında yer alacak suyun kalitesi kadar önemli olmasa da, kür suyu olarak kullanılacak suyun içinde de betonda zararlı kimyasal olaylara yol açacak veya betonun yüzeyinin lekelenmesine neden olabilecek yabancı maddelerin yer almaması gerekmektedir (TS EN 196-1,2009).

Deneylerde kullanılan karışım ve bakım suyu şehir şebekesinden alınan içme suyudur. Beton karışım ve bakım suyunun kalitesi ile ilgili özel bir Türk Standardı yoktur. Çeşitli kaynaklarda karma suyu genel anlamda içilebilir su olarak ifade edilmektedir.

### **3.2 Beton Karışım Oranları**

Beton karışım hesabı TS 802'de (2009) belirtilen mutlak hacim metoduna göre yapılmıştır. Karışımlarda kullanılan su-bağlayıcı oranı 0,5'tir. Çalışmada öncelikle, CEM I ve CEM II çimentoları kullanılarak iki grup şahit karışım hazırlanmıştır. Bunlara ek olarak sadece yüksek fırın cürufu bağlayıcı ile alkali ile aktive edilmiş beton karışımları hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda 300, 350 ve 400 kg/m<sup>3</sup> olmak üzere 3 farklı bağlayıcı miktarı seçilmiştir. Aktive edilmiş numunelerde Na dozajı %4, %6 ve %8 olacak şekilde farklı karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca, karışımlarda sadece Na(OH) ve Na(OH)+Na<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> olmak üzere iki farklı aktivatör tipi kullanılmıştır. Böylece toplam 24 farklı karışım hazırlanmıştır. Bir metreküp beton numunesi içinde bulunan malzeme miktarları Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

**Çizelge 3.6.** Bir metreküp betonu oluşturan malzeme miktarları

Karışım Kodu	Çimento (kg)	CÜRUF (kg)	S/Ç	Su (kg)	Na (%)	Na(OH) (kg)	Na <sub>2</sub> (SiO) (kg)	Na (kg)	Agrega (Kg)
ŞK1(CEM-I)	300	-	0,5	150					1911
ŞK2(CEM-I)	350	-	0,5	175					1804
ŞK3(CEM-I)	400	-	0,5	200					1697
ŞK4(CEM-II)	300	-	0,5	150					1911
ŞK5(CEM-II)	350	-	0,5	175					1804
ŞK6(CEM-II)	400	-	0,5	200					1697
K1		300	0,5	150	4	20,87		12	1859
K2		300	0,5	150	6	31,30		18	1846
K3		300	0,5	150	8	41,74		24	1833
K4		300	0,5	105,41	4	10,73	68,62		1913
K5		300	0,5	83,12	6	16,1	102,93		1928
K6		300	0,5	60,8	8	21,46	137,24		1942
K7		350	0,5	175	4	24,35		14	1743
K8		350	0,5	175	6	36,52		21	1728
K9		350	0,5	175	8	48,70		28	1713
K10		350	0,5	123	4	12,5	80,06		1807
K11		350	0,5	97	6	18,78	120,1		1823
K12		350	0,5	70,96	8	25,04	160,12		1840
K13		400	0,5	200	4	27,83		16	1627
K14		400	0,5	200	6	41,74		24	1610
K15		400	0,5	200	8	55,65		32	1593
K16		400	0,5	140,55	4	14,03	91,5		1700
K17		400	0,5	110,82	6	21,46	137,24		1719
K18		400	0,5	81,1	8	28,62	183		1738

### 3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Beton üretiminde, Fotoğraf 3.3.'de görüldüğü gibi, dram tipi beton mikseri kullanılmıştır. Beton mikserinin içerisine önce kaba ve ince agregalar konularak karışım homojen hale gelinceye kadar mikser çalıştırılmıştır. Daha sonra bağlayıcı ilave edilmiş ve homojenlik sağlanıncaya kadar karıştırmaya devam edilmiştir. Şahit karışımlarda karma suyu ilave edilerek beton karıştırılmaya devam edilmiştir. Ancak, alkali ile aktive edilmiş karışımlarda önce karışım suyu ile aktivatörler karıştırılmış ve bu karışım mikser içerisine eklenmiştir.



**Fotoğraf 3.3. Taze betonun hazırlanması**

Basınç dayanımı deneyleri için TS EN 206-1/A1'e (2005) uygun olarak hazırlanan beton numuneleri Fotoğraf 3.4.'de görüldüğü gibi 100x100x100 mm'lik küp kalıplara yerleştirilmiştir. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkartılmış ve  $20\pm 2$  °C sıcaklıktaki kür havuzuna konularak basınç deneyi yapılacak zamana kadar bekletilmiştir. Hidratasyon sıcaklığı ölçümü için ise taze beton numunesi 150x150x150 mm ebatlarındaki deney düzeneğine yerleştirilmiştir.



**Fotoğraf 3.4.** Taze betonların kalıplara yerleştirilmiş hali

### **3.4 Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneysel Çalışmalar**

#### **3.4.1 Basınç dayanımı**

100x100x100 mm boyutlu beton numuneler, TS EN 12390-3'e (2010) uygun olarak 3., 7. ve 28. günlerde tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı ölçümleri, her bir beton yaşı için üç numune üzerinde yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Deneyler, Fotoğraf 3.5.'de görülen 3000 kN kapasiteli basınç aletinde yaklaşık 0.5 MPa/sn yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir.



**Fotoğraf 3.5.** Basınç dayanımı test cihazı

Numunelerin basınç dayanımları eşitlik (3.1) kullanılarak bulunmuştur.

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

Burada:

$f_c$ : Basınç dayanımı

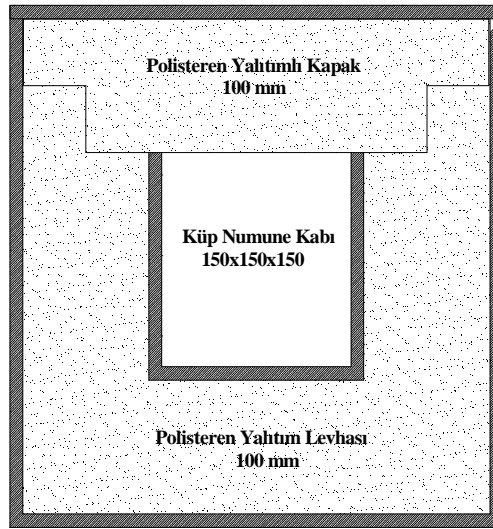
P: Preste kırılma anında okunan en büyük yük

$A_c$ : Numunenin basınç yükü uygulanan kesit alanı

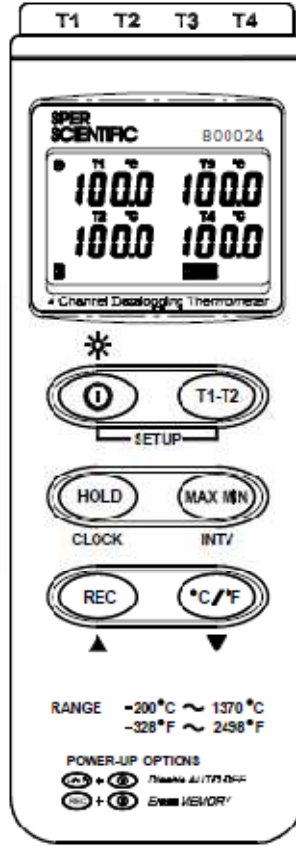
### 3.4.2 Hidratasyon sıcaklıklarının ölçülmesi

Çizelge 3.6.'da 1 m<sup>3</sup> beton için malzeme miktarları verilen beton karışımlarının hidratasyon sıcaklıklarının ölçülmesi için Şekil 3.2. ve Fotoğraf 3.6.'da verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Deney düzeneği iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım, içerisinde 150x150x150 mm ebatlarında numune kabı bulunan, etrafı 100 mm

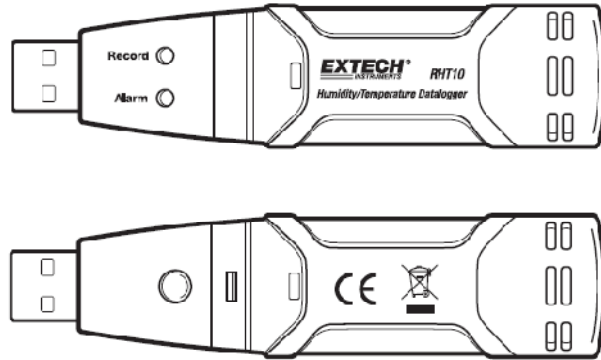
kalınlığında polisteren yalıtım levhasıyla kaplı, 18 mm kalınlığında suntalam kutudan oluşmaktadır. İkinci kısım ise, Şekil 3.3.'de görülen beton numunelerinin sıcaklıklarının ölçüldüğü TestLink SE309 dört kanallı datalogger termometreden oluşmaktadır. Aynı anda dört adet numune kabından sıcaklık sensörü vasıtasıyla 15'er dakika arayla beton numunelerindeki sıcaklık değişimleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.4.'de görülen Extech RHT10 nem ve ısı ölçer datalogger vasıtasıyla da ortam sıcaklıkları 30'ar dakika arayla ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Fotoğraf 3.7. ve fotoğraf 3.8.'de deneyin gerçekleştirilmesi aşamaları görülmektedir.



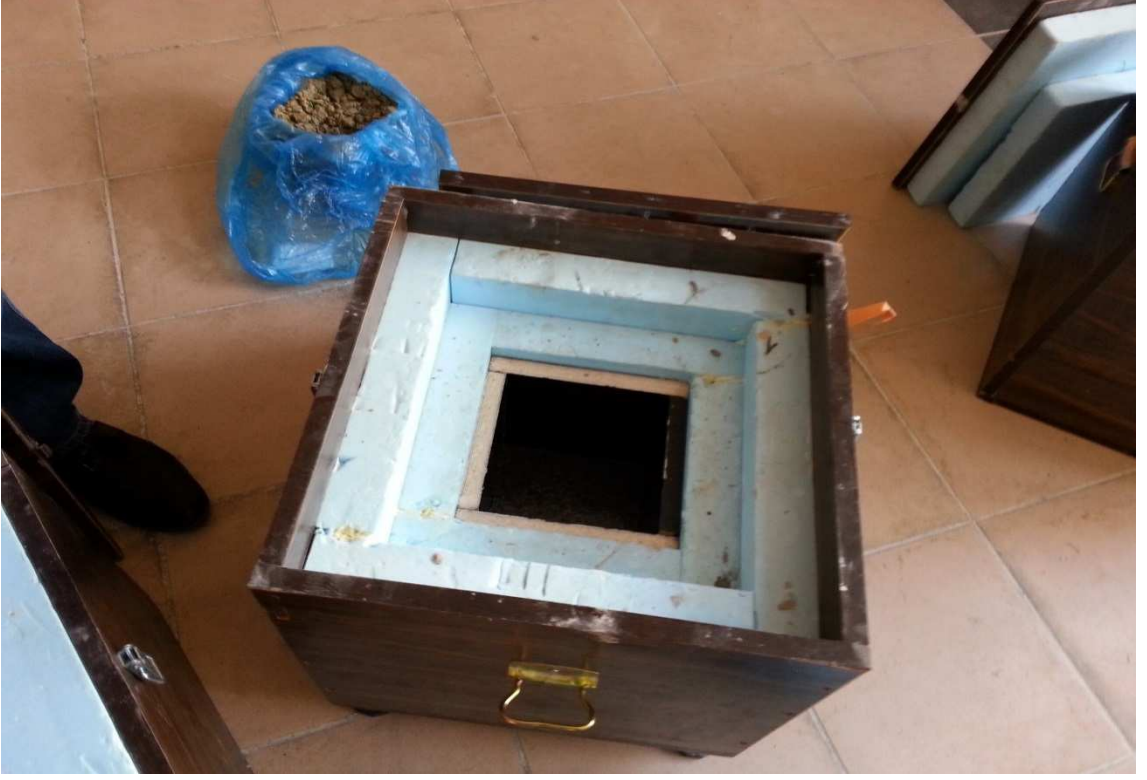
**Şekil 3.2.** Beton hidratasyon sıcaklık ölçümünde kullanılan yalıtımlı kutu



Şekil 3.3. TestLink SE309 dört kanallı datalogger



Şekil 3.4. Extech RHT10 nem ve ısı ölçer datalogger



**Fotoğraf 3.6.** Yarı adyabatik numune saklama kabı



**Fotoğraf 3.7.** Thermocouple'ın beton içine yerleştirilmesi



**Fotoğraf 3.8.** Sıcaklık ölçme düzeneği

## BÖLÜM IV

### BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, alkali ile aktivite edilmiş yüksek fırın cürufllu ve iki farklı çimento tipi kullanılarak toplam 24 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan beton karışımlarının 3., 7. ve 28. günlerdeki basınç dayanımı ve bu karışımlara ait hidrasyon sıcaklıkları ölçülerek grafikler halinde sunulmuş ve yorumlanmıştır. Çalışmalar  $22\pm 3^{\circ}\text{C}$  laboratuvar ortamında yapılmıştır. Bundan sonra ki bölümlerin belli kısımlarında aktivatör olarak kullanılan NaOH (Sodyum Hidroksit) için NH,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (Sodyum Silikat) için ise NS kısaltması kullanılacaktır.

#### 4.1 Basınç Dayanımı

Deneysel çalışma kapsamında üretilen 24 farklı karışıma ait 3., 7. ve 28. günlerdeki  $10 \times 10 \times 10$  cm'lik küp numunelere ait basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.1.'de toplu olarak verilmiştir. Çizelge 4.1. incelendiğinde numunelerin basınç dayanımı değerlerinin zamana bağlı olarak arttığı görülmektedir. Aktivatör kullanılarak hazırlanan betonların basınç dayanımı değerleri K18 karışımında tüm günlerde şahit numunenin basınç dayanımı değerini geçmiş, diğer karışımlarda ise bağlayıcı miktarı, bağlayıcı tipi, aktivatör tipi ve sodyum dozajına göre farklı değerler almıştır. Bağlayıcı miktarının, aktivatör tipinin ve sodyum dozajının basınç dayanımına etkisi ayrıca başlıklar halinde incelenmiştir.

**Çizelge 4.1.** Numunelerin basınç dayanımı değerleri (MPa)

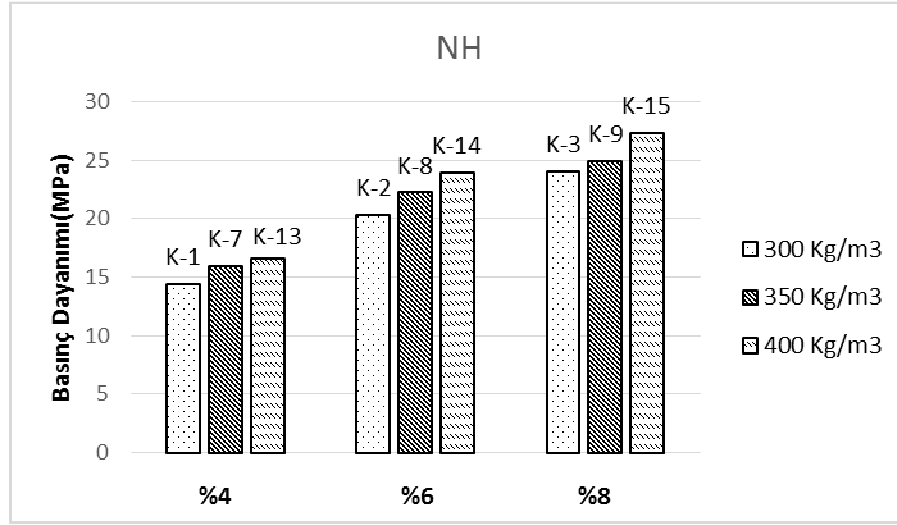
		Karışım	Beton yaşı (Gün)		
			3	7	28
300 Kg/m <sup>3</sup>	CEM I	ŞK1	26,1	35	46
350 Kg/m <sup>3</sup>		ŞK2	20,2	32,7	48,1
400 Kg/m <sup>3</sup>		ŞK3	26,1	32,2	49,8
300 Kg/m <sup>3</sup>	CEM II	ŞK4	34,4	43,6	48
350 Kg/m <sup>3</sup>		ŞK5	29,2	39,3	52
400 Kg/m <sup>3</sup>		ŞK6	29,6	39	53,1
300 Kg/m <sup>3</sup>	NaOH	K1	6,8	8,5	14,4
		K2	9,3	13,4	20,3
		K3	10,5	16,1	24
	NaOH+ NaSiO <sub>4</sub>	K4	10,9	27,5	38
		K5	28,5	39	53,9
		K6	29,5	39,8	52,5
350 Kg/m <sup>3</sup>	NaOH	K7	6,1	9,8	15,9
		K8	9,8	13,2	22,2
		K9	10,8	15,7	25
	NaOH+ NaSiO <sub>4</sub>	K10	9,9	27,5	51,7
		K11	27,6	47,1	67,1
		K12	29,2	44,1	68,2
400 Kg/m <sup>3</sup>	NaOH	K13	6,4	9,3	16,7
		K14	10,3	15	23,9
		K15	11	17,4	27,3
	NaOH+ NaSiO <sub>4</sub>	K16	11,4	31,9	54,4
		K17	26,8	48,9	70,1
		K18	33,8	57,3	72,4

#### 4.1.1 Bağlayıcı miktarının basınç dayanımına etkisi

Bu bölümde bağlayıcı miktarının basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Çalışmada 3 farklı bağlayıcı miktarı kullanılarak beton karışımları hazırlanmıştır. Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'te bağlayıcı olarak NH, NS ve çimento (CEM I, CEM II) kullanılarak hazırlanan numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri verilmiştir.

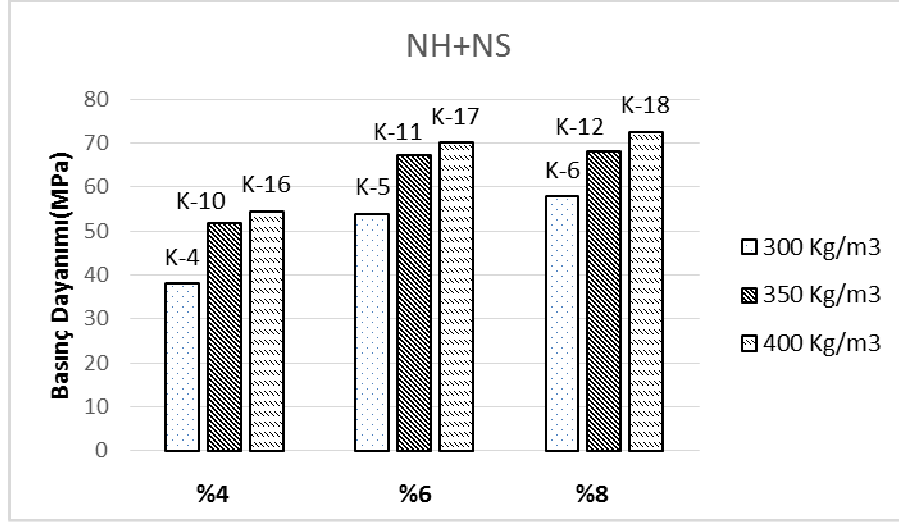
Şekil 4.1'de NH kullanılarak hazırlanan numunelerin farklı Sodyum (Na) dozajı için 28 günlük basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Şekil 4.1. incelendiğinde tüm farklı Na

dozajlarında, bağlayıcı miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmektedir.



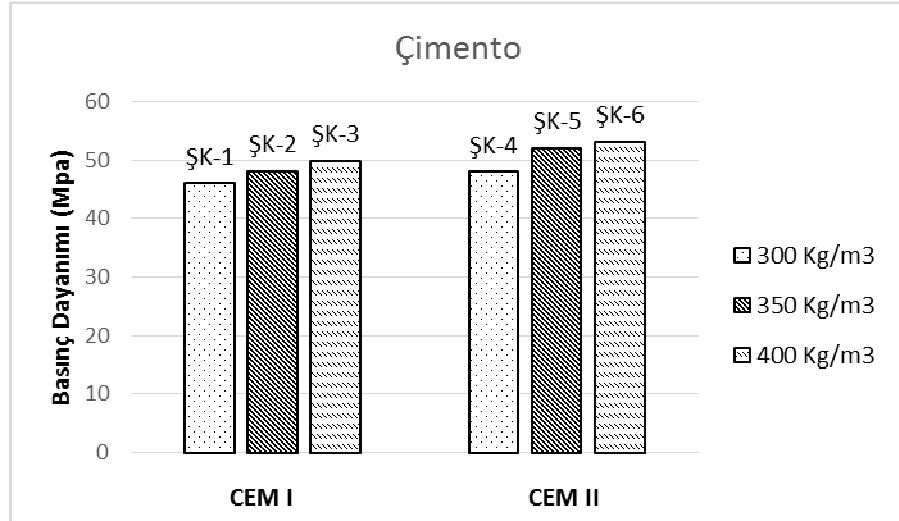
**Şekil 4.1.** Bağlayıcı miktarının NaOH kullanılarak hazırlanan karışımların basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.2.'de NH ve NS kullanılarak hazırlanan numunelerin farklı Sodyum (Na) dozajı için 28 günlük basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Şekil 4.2. incelendiğinde tüm farklı Na dozajlarında, bağlayıcı miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmektedir. Ancak NH kullanılarak hazırlanan numunelerden farklı olarak, NS kullanılarak hazırlanan numunelerin basınç dayanımları, bağlayıcı miktarı 300 kg/m<sup>3</sup>'ten 350 kg/m<sup>3</sup>'e çıktığında belirgin bir şekilde artarken, bağlayıcı miktarı 350 kg/m<sup>3</sup>'ten 400 kg/m<sup>3</sup>'e çıktığında belirgin bir artış göstermemiştir.



Şekil 4.2. Bağlayıcı miktarının NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılarak hazırlanan karışımların basınç dayanımına etkisi

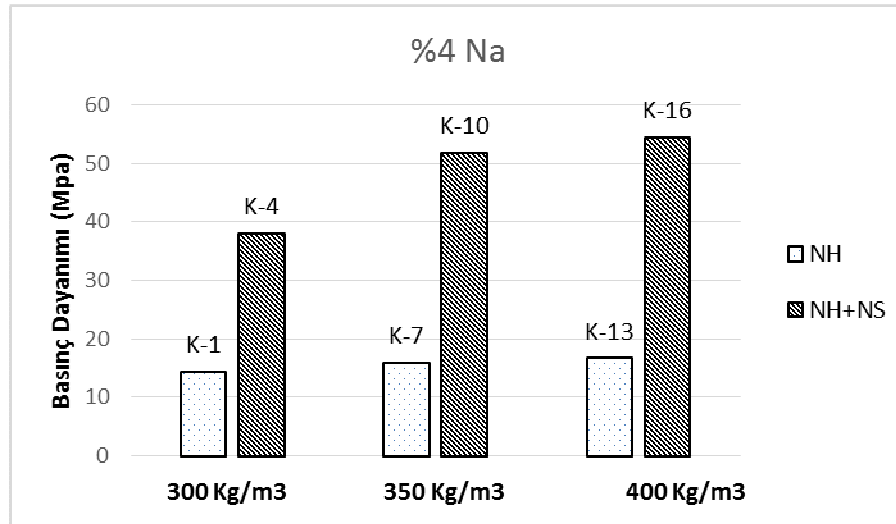
Şekil 4.3.'te Bağlayıcı olarak çimento (CEM I ve CEM II) kullanılarak hazırlanan numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Şekil 4.3. incelendiğinde hem CEM I hem de CEM II kullanılarak hazırlanan numunelerde, bağlayıcı miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmektedir.



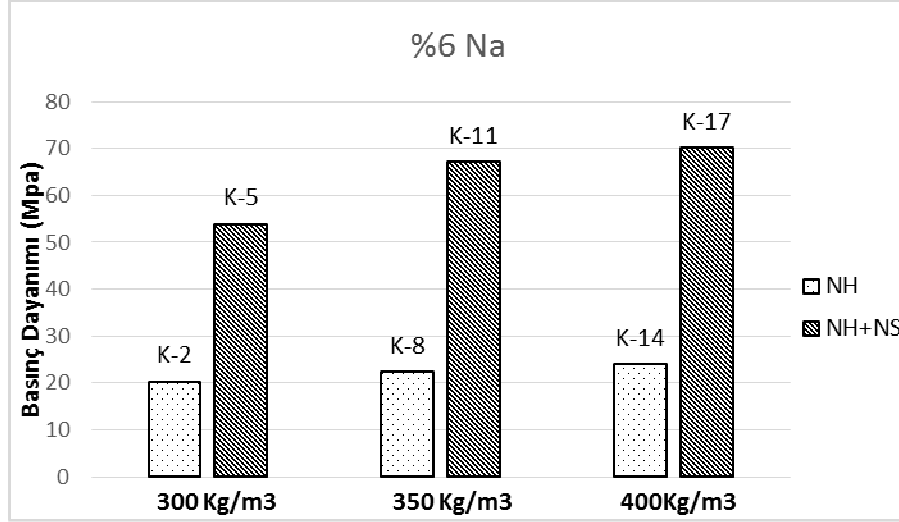
Şekil 4.3. Bağlayıcı miktarının çimento kullanılarak hazırlanan karışımların basınç dayanımına etkisi

#### 4.1.2 Aktivatör tipinin basınç dayanımına etkisi

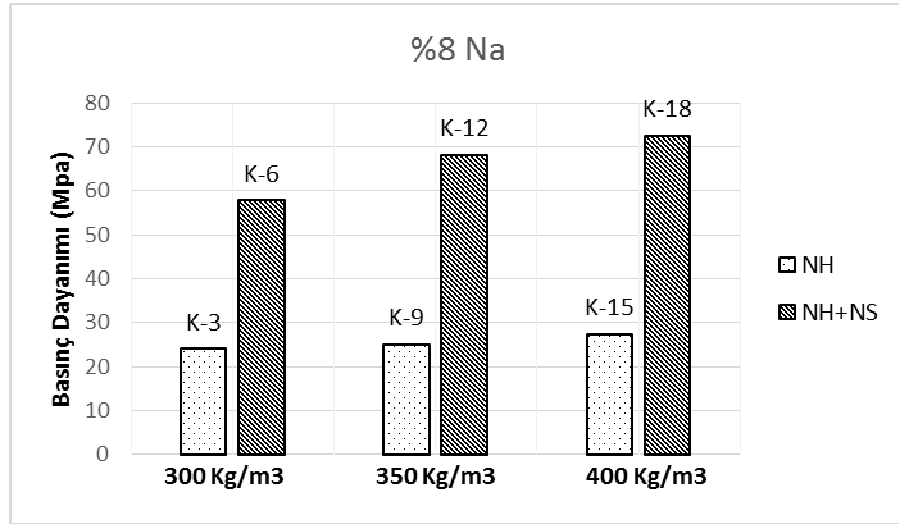
Aktivatör kullanılarak hazırlanan numunelerin basınç dayanımı değerleri Şekil 4.4-6.'da sunulmuştur. Şekil 4.4. %4 Na dozajında hazırlanan, Şekil 4.5. %6 Na dozajında hazırlanan ve Şekil 4.6. %8 Na dozajında hazırlanan numunelerin basınç dayanımı aktivatör tipi ilişkisini göstermektedir. NH kullanılarak hazırlanan numunelerde (K1, K7, K13, K2, K8, K14, K3, K9, K15) basınç dayanımı değerleri 14.4 MPa ile 27.3 MPa arasında değişirken, NH+NS kullanılarak hazırlanan numunelerde (K4, K10, K16, K5, K11, K17, K6, K12, K18) ise basınç dayanımı değerleri 37.9 MPa ile 72.4 MPa arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 4.4-6.'da görüldüğü gibi Na dozajından bağımsız olarak, NH ile NS'ün birlikte kullanımı NH'ın tek başına kullanımına göre alkali ile aktive edilmiş betonların basınç dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu artış miktarı %191 seviyesine kadar ulaşmıştır.



Şekil 4.4. NaOH ve NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılan ve %4 Na dozajında hazırlanan numunelerin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.5. NaOH ve NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılan ve %6 Na dozajında hazırlanan numunelerin basınç dayanımı değerleri

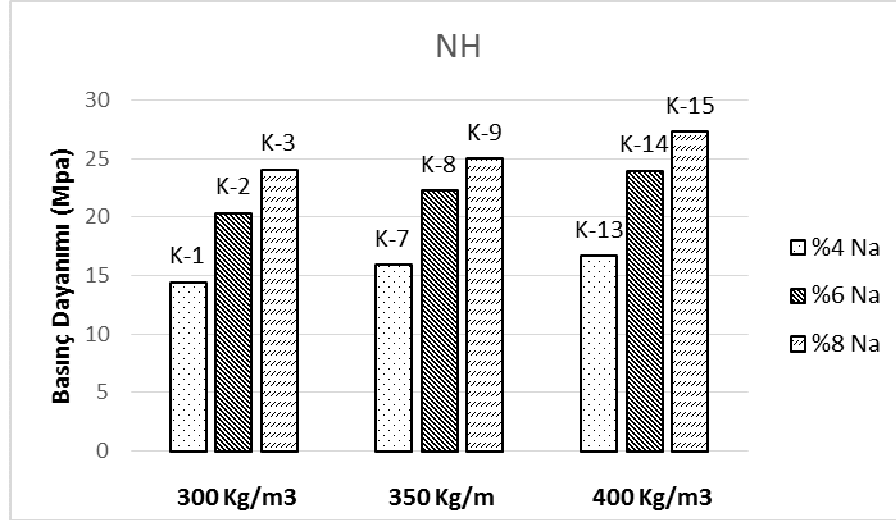


Şekil 4.6. NaOH ve NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılan ve %8 Na dozajında hazırlanan numunelerin basınç dayanımı değerleri

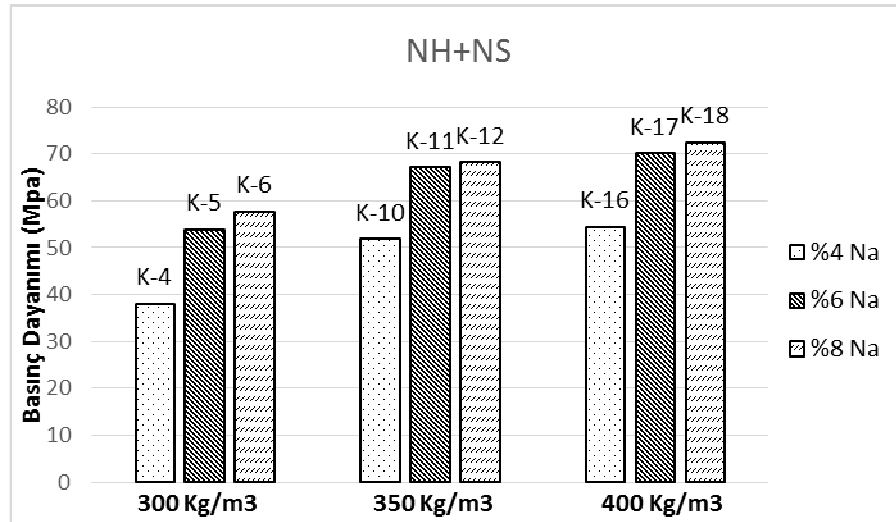
#### 4.1.3 Sodyum (Na) dozajının basınç dayanımına etkisi

Bu kısımda Na dozajının basınç dayanımına etkisi verilmiştir. Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de NH ve NH+NS kullanılarak hazırlanan numunelerin basınç dayanımları değerleri ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 4.7. ve Şekil 4.8. incelendiğinde Na dozajının artması ile birlikte basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. Bu durum bağlayıcı miktarlarının ve aktivatör tipinin değişiminden etkilenmemiştir. Ancak, Na dozajının %4 değerinden %6 değerine çıkarılması ile basınç dayanımında belirgin bir artış olduğu görülürken, Na

dozajının %6 değerinden %8 değerine çıkarıldığında basınç dayanımındaki artış miktarında azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 4.7. Na dozajının NaOH kullanılarak hazırlanan numunelerde basınç dayanımı üzerine etkisi



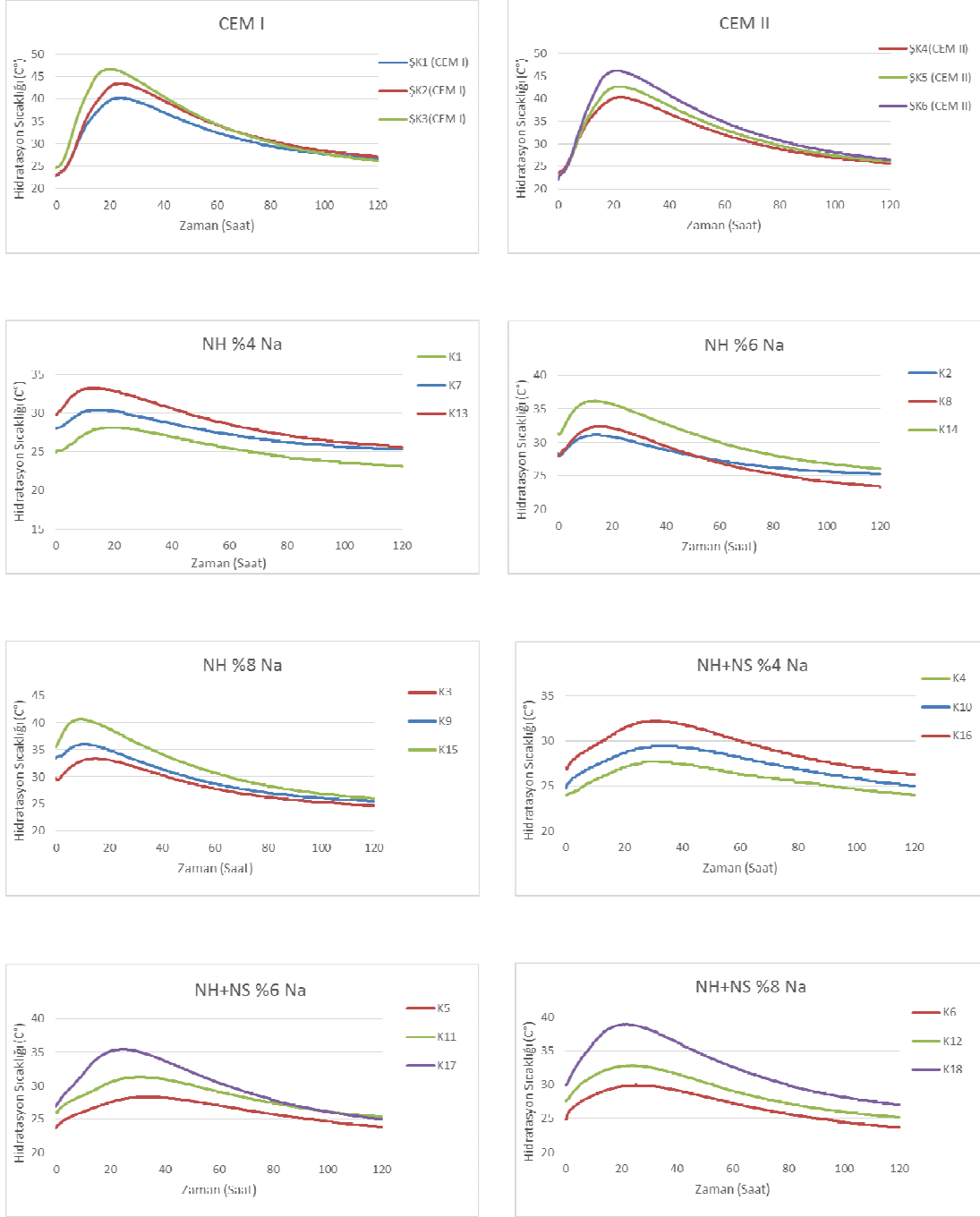
Şekil 4.8. Na dozajının NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılarak hazırlanan numunelerde basınç dayanımı üzerine etkisi

## 4.2 Hidratasyon Sıcaklığı

Bu bölümde alkali ile aktive edilmiş 18 adet karışım ve çimento (CEM I ve CEM II) kullanılarak hazırlanan 6 adet karışımın hidratasyon sıcaklıkları yarı adyabatik yöntemle ölçülerek grafikler halinde sunulmuş ve yorumlanmıştır. Yapılan çalışmalarda ortam sıcaklığı 30 dakika arayla ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Numune sıcaklıkları ise 120 saat (5 gün) boyunca 15 dakika aralıklarla ölçülerek kaydedilmiştir. Çalışmalar  $22\pm 3^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki laboratuvar ortamında yapılmıştır. Ortam sıcaklıkları Materyal ve Metod kısmında sunulmuş, karışıklığa neden olacağı düşünüldüğünden şekil üzerinde verilmemiştir. Bağlayıcı miktarının, bağlayıcı tipinin, aktivatör tipinin ve sodyum dozajının hidratasyon sıcaklığına etkisi ayrıca başlıklar halinde incelenmiştir.

### 4.2.1 Bağlayıcı miktarının hidratasyon sıcaklığına etkisi

Şekil 4.9.'da farklı tip bağlayıcılar, farklı tip aktivatörler ve Na dozajı için bağlayıcı miktarı hidratasyon sıcaklığı ilişkisi grafikler halinde ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 4.9. incelendiğinde bağlayıcı miktarının artması ile birlikte hidratasyon sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Bu durum tüm farklı bağlayıcı tiplerinde ve farklı Na dozajlarında görülmüştür. Çizelge 4.2.'de numunelere ait maksimum sıcaklıklar ve maksimum sıcaklığa ulaşma süreleri verilmiştir. Çizelge 4.2. incelendiğinde tüm karışımlarda bağlayıcı miktarının artması ile birlikte maksimum sıcaklığa ulaşma süresinde azaldığı yönünde bir eğilimin olduğu görülmektedir.



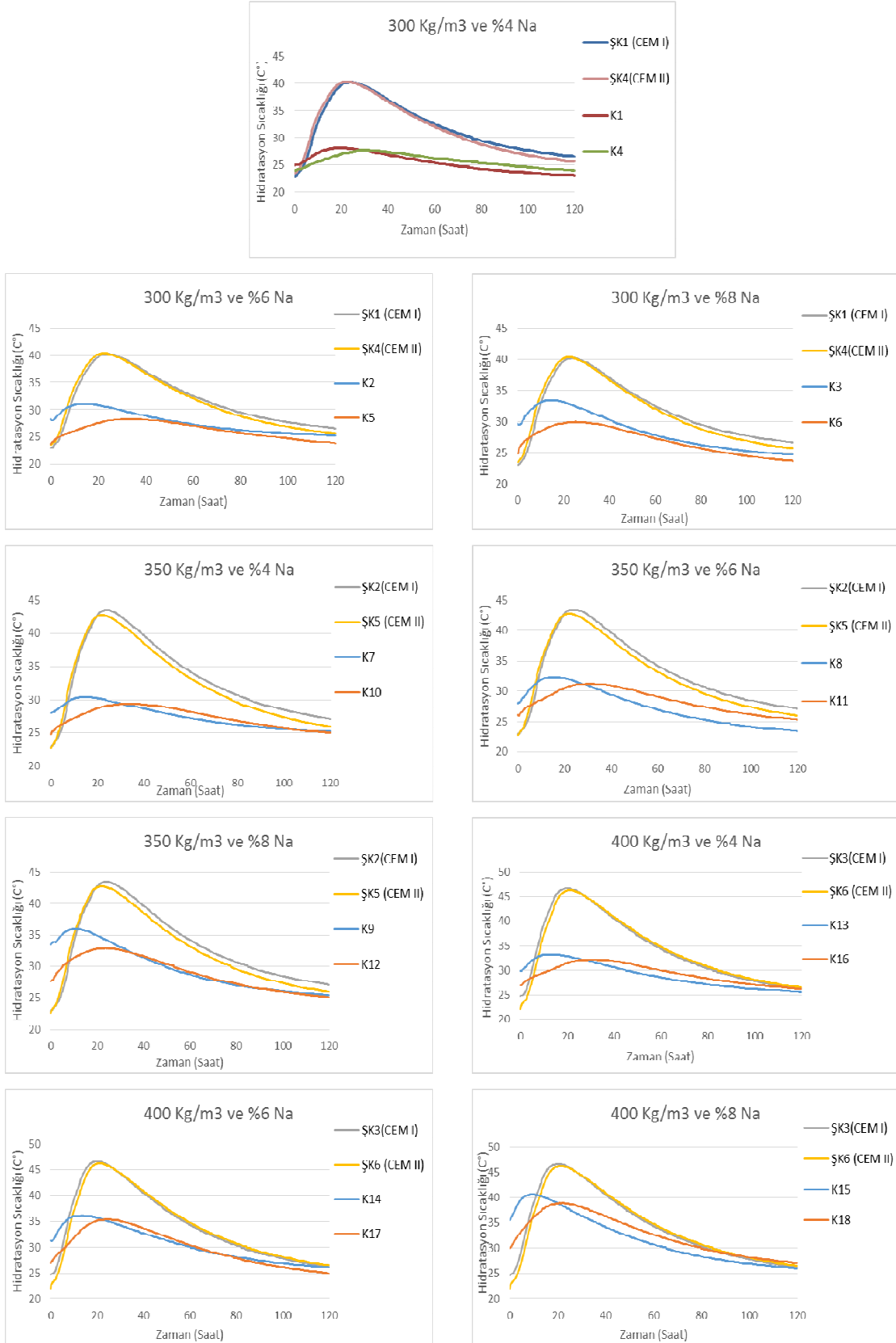
Şekil 4.9. Bağlayıcı miktarının hidrasyon sıcaklığına etkisi

**Çizelge 4.2.** Numunelere ait maksimum sıcaklıklar ve maksimum sıcaklığa ulaşma süreleri

Karışım Adı	Maks Sıcaklık (°C)	Maks Sıcaklık Ulaşma Süresi (saat)
ŞK1(CEM-I)	40.2	22.45
ŞK2(CEM-I)	43.4	23.00
ŞK3(CEM-I)	46.6	19.00
ŞK4(CEM-II)	40.3	21.15
ŞK5(CEM-II)	42.7	21.00
ŞK6(CEM-II)	46.2	20.00
K1	28.1	16.45
K2	31.1	12.30
K3	33.4	13.45
K4	27.5	27.45
K5	28.3	29.30
K6	30.1	25.15
K7	30.4	12.00
K8	32.3	13.00
K9	36.0	9.15
K10	29.4	29.45
K11	31.3	29.00
K12	32.9	22.15
K13	33.2	10.45
K14	36.2	13.15
K15	40.6	8.15
K16	31.6	29.00
K17	35.4	23.15
K18	38.9	20.30

#### 4.2.2 Bağlayıcı tipinin hidrasyon sıcaklığına etkisi

Şekil 4.10.'da farklı bağlayıcı miktarlarında ve farklı Na dozajlarında CEM I, CEM II, NH ve NS kullanılarak hazırlanan numunelere ait hidrasyon sıcaklığı değişimi grafik halinde ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 4.10.'da bağlayıcı olarak çimento veya aktivatör kullanımının hidrasyon sıcaklığına etkisi açıkça görülmektedir. Bağlayıcı olarak CEM I ve CEM II kullanılarak hazırlanan karışımlar arasında hidrasyon sıcaklığı bakımından pek fark görülmemektedir.



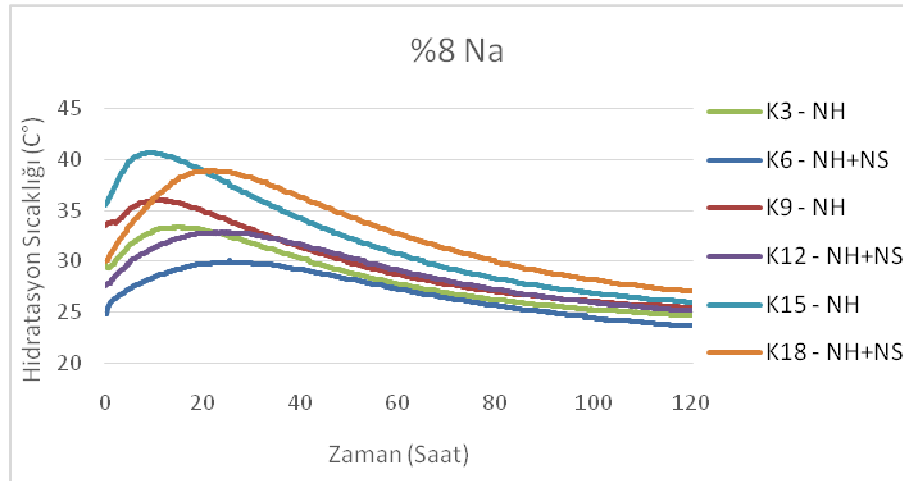
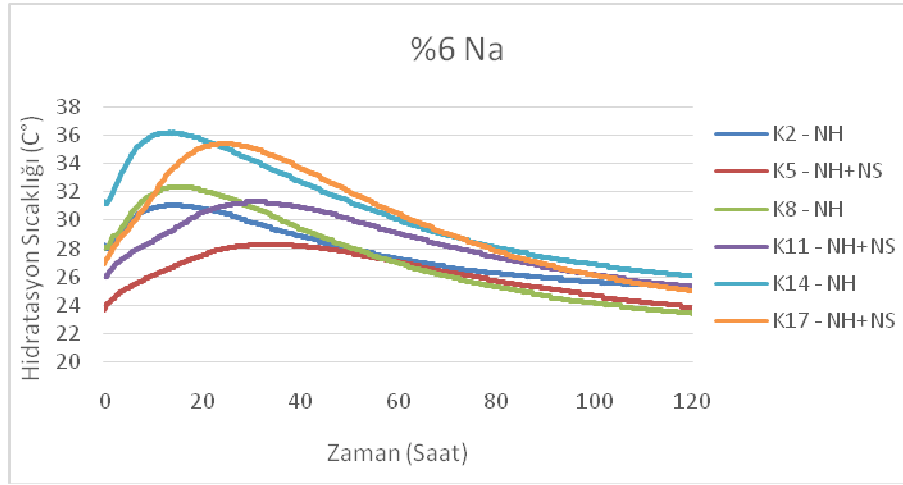
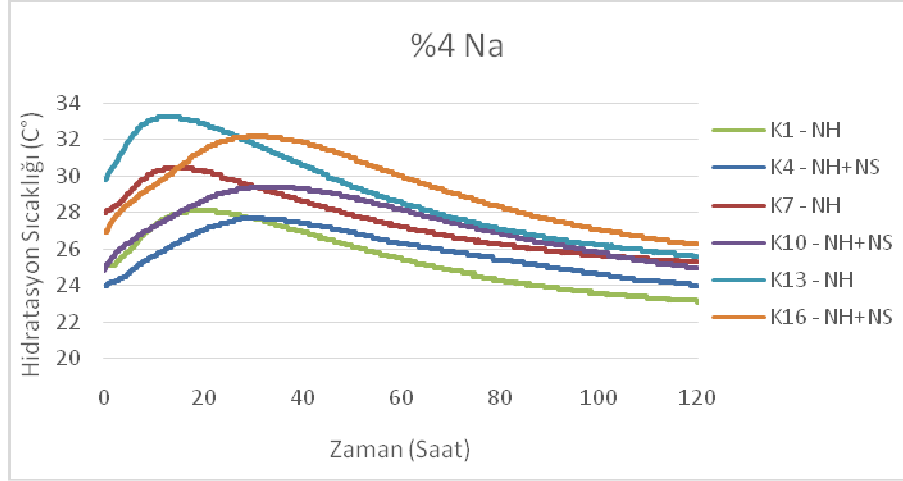
**Şekil 4.10.** Bağlayıcı tipinin numunelerin hidrasyon sıcaklığı değişimine etkisi

Bağlayıcı olarak çimento kullanımı, bağlayıcı olarak cüruf ile birlikte aktivatör kullanımına göre numunelerin hidrasyon sıcaklığını büyük ölçüde artırmıştır. Çimento bağlayıcılı numunelerde ulaşılan maksimum hidrasyon sıcaklığı 40.2 °C ile 46.6 °C arasında değişirken, aktivatör kullanıldığında bu sıcaklık 27.5 °C ile 40.6 °C arasında değişmektedir. Maksimum sıcaklığa ulaşma süresi ise aktivatör tipine bağlı olarak çimentolu bağlayıcı ile hazırlanan numunelerden daha kısa veya uzun olabilmektedir.

#### **4.2.3 Aktivatör tipinin hidrasyon sıcaklığına etkisi**

Çalışma kapsamında NH ve NH+NS olmak üzere iki farklı aktivatör kullanılmıştır. Şekil 4.11.'de diğer tüm karışım özellikleri aynı fakat sadece aktivatör tipi farklı olan karışımların hidrasyon sıcaklıkları grafik halinde sunulmuştur. Şekil 4.11. incelendiğinde, aktivatör olarak NH kullanıldığında ortaya çıkan hidrasyon sıcaklığı, aktivatör olarak NS kullanımına göre ortaya çıkan hidrasyon sıcaklığından daha yüksek olduğu görülmektedir. Tüm karışımlarda bu durum geçerlidir. Çizelge 4.2. incelendiğinde, aktivatör olarak NH kullanılan numunelerde ulaşılan maksimum hidrasyon sıcaklığının 28.1 °C ile 40.6 °C arasında değiştiği, aktivatör olarak NS kullanıldığında ise bu sıcaklığın 27.5 °C ile 38.9 °C arasında değiştiği görülmektedir. Ancak NS kullanıldığında maksimum sıcaklığa ulaşma süresi uzamıştır. NH kullanıldığında maksimum sıcaklığa ulaşma süresi 8 saat 15 dakika ile 16 saat 45 dakika arasında değişirken NS kullanıldığında maksimum sıcaklığa ulaşma süresi 20 saat 30 dakika ile 29 saat 45 dakika arasında değişmektedir.

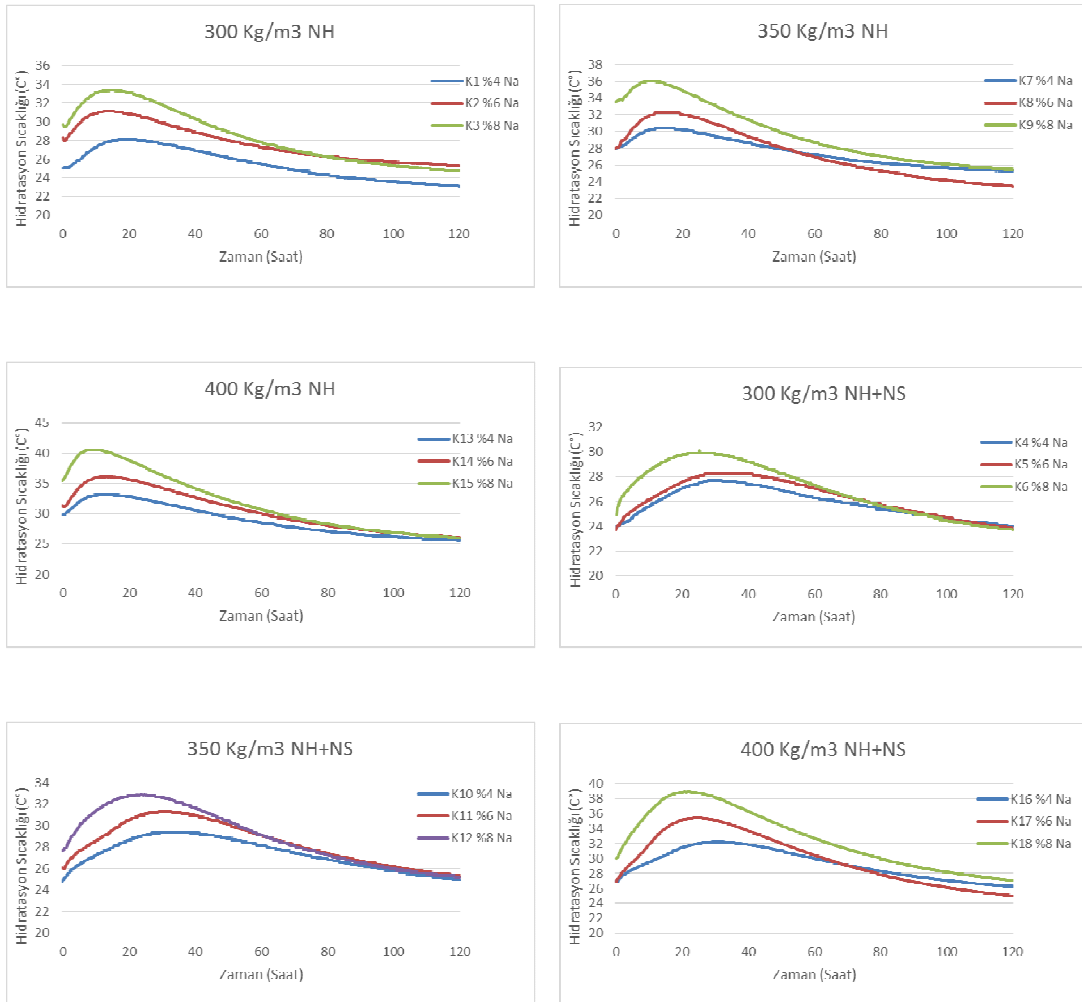
Özellikle aktivatör olarak NS kullanıldığında ortaya düşük hidrasyon sıcaklığına sahip bir ürün çıkmakta ve yüksek basınç dayanımı elde edilmektedir. Bu sebeple NS'nin, hidrasyon sıcaklığının önemli olduğu kütle betonlarında kullanılması durumunda önemli avantaj sağlanacaktır.



**Şekil 4.11.** Aktivatör tipinin numunelerde oluşan hidrasyon sıcaklığına etkisi.

#### 4.2.4. Sodyum dozajının hidratasyon sıcaklığına etkisi

Şekil 4.12.'de her bir farklı bağlayıcı miktarı ve aktivatör tipi için Na dozajının hidratasyon sıcaklığına etkisi sunulmuştur. Şekil 4.12. incelendiğinde Na dozajının artmasıyla numunelerin hidratasyon sıcaklıklarının arttığı görülmektedir. %4 Na dozajında hidratasyon sıcaklığı 27.5 °C ile 33.2 °C aralığında değişmekte, %6 Na dozajında hidratasyon sıcaklığı 28.3 °C ile 36.2 °C aralığında değişmekte ve %8 Na dozajında ise hidratasyon sıcaklığı 30.1 °C ile 40.6 °C aralığında değişmektedir. Numunelere ait hidratasyon sıcaklıkları incelendiğinde, hidratasyon sıcaklığının %6 Na dozajından %8 Na dozajına geçişte, %4 Na dozajından %6 Na dozajına geçişte oranla daha fazla arttığı görülebilmektedir.



Şekil 4.12. Na dozajı ile hidratasyon sıcaklığı ilişkisi

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- ✓ Bağlayıcı miktarı arttıkça, numunelerin basınç dayanımı değerleri artmaktadır.
- ✓ NH ile NS'ın birlikte kullanımı NH'ın tek başına kullanımına göre alkali ile aktive edilmiş betonların basınç dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu artış miktarı %191 seviyesine kadar ulaşmaktadır.
- ✓ Na dozajının artması ile birlikte basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. Bu durum bağlayıcı miktarlarının ve aktivatör tipinin değişiminden etkilenmemiştir. Ancak, Na dozajının %4 değerinden %6 değerine çıkarılması ile basınç dayanımında belirgin bir artış olurken, Na dozajı %6 değerinden %8 değerine çıkarıldığında basınç dayanımındaki artış miktarında azalma olmaktadır.
- ✓ Bağlayıcı miktarının artması ile birlikte hidrasyon sıcaklığı da artmaktadır. Aynı zamanda bağlayıcı miktarının artması ile birlikte maksimum sıcaklığa ulaşma süresi de azalmaktadır.
- ✓ Çimento kullanılarak hazırlanan betonların hidrasyon sıcaklıkları, cüruf ile birlikte aktivatör kullanılarak hazırlanan betonların hidrasyon sıcaklıklarına oranla büyük ölçüde artmıştır.
- ✓ Aktivatör olarak NH kullanıldığında ortaya çıkan hidrasyon sıcaklığı, aktivatör olarak NS kullanımına göre ortaya çıkan hidrasyon sıcaklığından daha yüksek olmaktadır. Ancak NS kullanıldığında maksimum sıcaklığa ulaşma süresi uzamıştır.

- ✓ Özellikle aktivatör olarak NS kullanıldığında ortaya düşük hidrasyon sıcaklığına sahip bir ürün çıkmakta ve yüksek basınç dayanımı elde edilmektedir. Bu sebeple NS'nin, hidrasyon sıcaklığının önemli olduğu kütle betonlarında kullanılması durumunda önemli avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.
  
- ✓ Na dozajının artmasıyla numunelerin hidrasyon sıcaklıkları artmaktadır. Hidrasyon sıcaklığı %6 Na dozajından %8 Na dozajına geçişte, %4 Na dozajından %6 Na dozajına geçiş oranla daha fazla artmıştır.

## KAYNAKLAR

Akçaözoğlu, S., Atık pet şişe kırıklarının hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana 2008.

Alshamsı, A. M., 1997. Mikrosilica and Ground Granulated Blast Furnace Slag Effects on Hydration Temperature. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 12, pp. 1851–1859.

Aruntaş, H. Y., Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyelleri, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Ankara, 2006.

ASTM C989 (1994) Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars, 1994.

Atanur, A., Yol Yapımında Yüksek Fırın Cürufu , *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara, 1983.

Aydın, S., Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın curufu 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, 1999.(a)

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, 1999.(b)

Baradan,B., Aydın, S. ve Yazıcı,H., Beton, *İzmir: Dokuz Eylül Üniv. Yayınları*, İzmir,2012.

Belli, Y., Yüksek Fırın Cüruflarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Maden Fakültesi* İstanbul,1975.

Bernal, S.A., Et AL., Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cement and Concrete Research*, 2011.

Beycioğlu, A., Başıyigit, C., Subaşı, S., “Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı ile Geri Kazanılması ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması” *Çevre Sorunları Sempozyumu*, 1386-1394, Kocaeli, 2008.

Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, S.T. ve Çapar, Ö.F., Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi, *2. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi*, Mersin, 2010.

Bilim C., Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanabilirliği., Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Adana, 2006.

Binici, H., Temiz, H., ve KÖSE, M.M., The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice. *Construction and Building Materials*, 2007.

Binici, H., H.K., Temiz, H., Görür, E.B., Yüksek fırın cürufu ve bazaltik ponza katkılı betonların bazı durabilite özellikleri. Pamukkale *Journal Agent*, 2008(3): p. 309-317.

Binici, H., H.S., Durgun, M.Y., Barit, bazaltik ponza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların özellikleri. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2010.

Brooks, J. J., Wainwright, P. J., Boukendakji, M., 1992. Influence of Slag Type and Replacement Level on Strength, Elasticity, Shrinkage and Creep of Concrete. Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, *American Concrete Institute, Farmington Hills*, Mich., İstanbul, pp. 1325-1341.

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

Collins, F. and Sanjayan, J. G., Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete, *Cement And Concrete Composites*, 23, 345–352, 2001

Çevik, M., Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül Den Taşıyıcı Hafif Agrega Üretimi. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, s. 235–242.1993.

Elibol,C., Alkalilerle Aktive Edilen Çimento Esaslı Malzemelerin Basınç Dayanımlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2012.

Erdoğan, T.Y., “Atık Maddelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara, 1993.

Erdoğan, T.Y., Öğütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, 1995.

Erdoğan, T. Y., Beton. *ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş. Ankara, 2003.*

Fernandez-Jimenez, A.Palomo, J.G and Puertas, F., Alkali Activated Slag Mortars mechanical strength behaviour, *Cement and Concrete Research*, 29 (8), 1313–1321, 1999.

Geiseler, J., Kollo, H., Lang, E., Influence of Blast-Furnace Cements on Durability of Concrete Structures. *ACI Material Journal*, Vol. 92, No. 3, pp. 252–257, 1995.

Günderli, U., Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2008.

Güner, A. , “Günümüzde Yüksek Fırın Cürufu İnşaat Sektöründe Kullanımı” *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara, 1993.

Karizan, D. and Zivanovic, B., Effect of dosage and modulus of waterglass on early hydration of alkali slag cements, *Cement and Concrete Research*, 32, 1181-1188, 2002.

Kaya, H., Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonda Su/Çimento Oranının Etkinlik Katsayısına Ve Kırılma Parametrelerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2010.

Kurt, Ç., Bittner, J. "Sodium Hydroxide", *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim: Wiley-VCH, 2005.

Nebiogulları, M.A., Metakaolin, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkısının beton hidrasyon sıcaklığına etkisi., *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2010.

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

Onat, O. B., Türkiye’de Üretilen Yüksek Fırın Cüruflarının Çimento Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 1998.

Osborne, G.J., Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 1999, 21(1): p. 11-21.

Özodabaş,A. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflu Harçların Performansının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya,2014.

Özkan, Ö., Çelikhane ve yüksek fırın cürufu katkılı portland çimentosunun özellikleri. *İMO Teknik Dergi*, 2006: p. 3893-3902.

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

Roy, D.M. and Idorn, G.M., Hydration, structure and Blast Furnace Slag Cements, mortarsand concrete, *ACI Journal, Proceedings*,79, (6), 445–457, 1982.

Sadok,H. A., Al,E., Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(2): p. 1018-1025.

Shi,C., P.V.K., Roy,D., Alkali-Activated *Cements and Concretes*, 2006.

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

Shi, C.,Krivenko, P.V. and Roy, D., Alkali activated *cements and concretes*, USA and Canada: Taylor and Francis, 2006.

Soroka, I., 1993. Concrete in Hot Environments. National Building Research Institute, Faculty of Civil Engineering, *Technion-Israel Institute of Technology*, Haifa, 247s.

Tokay, M., Erdoğan, K., Cürüfler ve Cürüflu Çimentolar. *Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Raporu*, TÇMB, Ankara, 1997.

Tokyay, M. ve Erdoğan, K., Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, 2002.

Tokyay ve Erdoğan, 2003, 'Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar', *TÇMB/AR-GE*, Ankara, 975-8136-03-08.

Tokyay, M., Cürüfla ve Cürüflü Çimentolar. *Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu*, TÇMB, Ankara, 2003.

Tomisawa, T., Chikada, T., Nagao, Y., 1992. Properties of Super Low Heat Cement Incorporating Large Amounts of Ground Granulated Blast Furnace Slag of High Fineness. Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, *American Concrete Institute, Farmington Hills*, Mich., İstanbul, pp. 1385–1399.

TS EN 197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2012.

TS EN 12390-3, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 196-1 Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2009.

TS 706 EN 12620+A1, Beton agregaları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2009.

TS 802, Beton karışım tasarımı hesap esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2009.

TS EN 206-1 A1, Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalât ve uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2005.

TS EN 1097-6, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.

*Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Mayıs*, Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar, Ankara, 2001.

Türkmen, İ., Gül, R., Çelik, C., Demirboğa, R., 2002. Mineral Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Özelliklerinin Optimum Şartlarının Araştırılması. **4. GAP Kongresi Bildiriler Kitapçığı**, v 2, pp.836-845.

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

Yazıcı, H., Yüksek fırın cürufu katkılı harçların sülfat dayanıklılığının incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2006, 8: p. 51-58.

Yüksel, İ., Siddique,R. ve Özkan,Ö., Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(2): p. 967-972.

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

## ÖZ GEÇMİŞ

Abdullah AÇIKGÖZ 1985’de Konya’da doğdu. 1996’da Konya Meram Selçuk İlk Okulunu, 2000 yılında Mehmet Karacığanlar Mevlana Ortaokulunu, 2003’te Meram Zeki Özdemir Lisesini bitirdi. 2005 yılında Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne girdi. Bu bölümden Haziran 2009’da mezun olan Açıkgöz, aynı yıl Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 2009 yılında Konya Gödene TOKİ 974 konut projesinde saha şefi olarak çalıştı. 2009-2010 yılları arasında Fultek Müşavirlik bünyesinde çeşitli toplu konut projelerinde Kontrol Mühendisi olarak görev aldı. 2010 yılında kısa dönem olarak askerlik hizmetini tamamladı. Haziran 2011 tarihinden itibaren Konya Selçuklu Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğünde Kontrol Mühendisi kadrosu ile memur olarak çalışmaktadır.