İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLEN ÇİMENTO ESASLI MALZEMELERİN BASINÇ DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Caner ELİBOL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

EKİM 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLEN ÇİMENTO ESASLI MALZEMELERİN BASINÇ DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Caner ELİBOL
(501091096)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL

EKİM 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501091096 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Caner ELİBOL** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"ALKALİLERLE AKTİVE EDİLEN ÇİMENTO ESASLI MALZEMELERİN BASINÇ DAYANIMLARININ İNCELENMESİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Yrd. Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Yrd. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Yrd. Doç. Dr. Özgür ÇAKIR Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **11 Ekim 2012**
Savunma Tarihi : **17 Ekim 2012**

Canım babama,

ÖNSÖZ

2003 yılında başladığım ve bana bir çok değer katan İstanbul Teknik Üniversitesi'ndeki öğrenimim süresince üzerimde emeği olan saygı değer öğretim görevlilerine ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bütün üniversite hayatım boyunca yol arkadaşlığı yaptığım, tezimi hazırlarken de desteğini hiçbir şekilde esirgemeyen Civan Özbek'e teşekkür ederim.

Son olarak ve en önemlisi, bu tezin hazırlanması sırasında bilgi ve birikimi ile bana yol gösteren, çalışmalarımda her türlü desteğini her zaman hissettiğim Sayın Yrd. Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL'e sonsuz teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Ekim 2012

Caner Elibol
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Puzolanlar 4
1.1.1 Puzolanik reaksiyon 4
1.1.2 Puzolanik aktiflik 5
1.1.3 Puzolanların kullanım amacı 6
1.2 Yüksek Fırın Cürufları 7
1.2.1 Önbilgi 7
1.2.2 Yüksek fırın cüruflarının üretimi 8
1.2.3 Yüksek fırın cüruflarının inceliği 9
1.2.4 Yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonu 9
1.2.5 Yüksek fırın cüruflarının yapısı 10
1.2.6 Yüksek fırın cüruflarının hidratasyonu 11
1.2.7 Yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı özelliklerini etkileyen faktörler 13
1.2.8 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının betonun özellikleri üzerine etkileri 14
1.2.8.1 Taze beton özellikleri zerine etkisi 14
Su ihtiyacı ve işlenebilirlik 14
Kanama - Kusma 15
Hidratasyon ısısı 15
Priz zamanı 15
1.2.8.2 Sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkisi 15
Basınç mukavemeti ve mukavemet gelişimi 15
Çekme mukavemeti 16
Sünme 16
Rötre 16
Elastisite modülü 17
1.2.8.3 Dayanıklılık özellikleri 17
Permeabilite 17
Sülfata dayanıklılık 17
Donma - Çözülme dayanıklılığı 18
Aşınma dayanıklılığı 18
Alkali - Silika reaksiyonu 18
Klor geçirgenliği 19
Karbonatlaşma 19

1.2.9 Kürün yüksek fırın cürufu katkılı betonlar üzerindeki etkisi 20
1.2.10 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özellikli malzeme olarak kullanılmaya uygunluğu 21
1.2.11 Yüksek fırın cüruflarının inşaat sektöründe kullanım alanları 22
1.2.11.1 Hafif beton agregası olarak kullanımı 22
1.2.11.2 Yol malzemesi ve asfalt betonu agregası olarak kullanımı 22
1.2.11.3 Katkılı çimento ve beton üretiminde kullanımı 22
Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun cüruflu çimento üretiminde kullanımı 23
Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton yapımında mineral katkı olarak kullanımı 23
1.2.12 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının beton katkı maddesi olarak kullanılabilirliğine dair standartların incelenmesi 24
1.3 Alkalin Aktivatörler 26
1.3.1 Sodyum hidroksit 26
1.3.1.1 Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri 26
1.3.1.2 Harç ve beton üretiminde sodyum hidroksit kullanımı 28
1.3.2 Sodyum karbonat 28
1.3.2.1 Sodyum karbonatın fiziksel ve kimyasal özellikleri 28
1.3.2.2 Harç ve beton üretiminde sodyum karbonat kullanımı 30
1.3.3 Sodyum silikat 30
1.3.3.1 Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri 30
1.3.3.2 Harç ve beton üretiminde sodyum silikat kullanımı 31
2. YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ÜZERİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR 33
2.1 Yüksek Fırın Cüruflu Betonlar ve Harçlar Üzerinde Yapılmış Çalışmalar 33
2.2 Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cüruflu Betonlar ve Harçlar Üzerinde Yapılmış Çalışmalar 36
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 53
3.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 53
3.1.1 Çimento 53
3.1.2 Yüksek fırın cürufu 54
3.1.3 Su 54
3.1.4 Sodyum karbonat 55
3.1.5 Sodyum hidroksit 55
3.1.6 Sodyum silikat 55
3.1.7 Agrega 55
3.1.7.1 CEN standart kumu 56
3.1.7.2 Krom cürufu 56
3.1.8 Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı 57
3.2 Üretilen Harç Tipleri 57
3.3 Yapılan Deneyler 64
3.3.1 Taze harç üzerinde yapılan deneyler 64
3.3.2 Sertleşmiş harçlar üzerinde yapılan deneyler 65
3.3.2.1 Eğilme dayanımı tayini 65
3.3.2.2 Basınç dayanımı tayini 66
3.3.2.3 Ultra ses geçiş hızı tayini 66
3.3.2.4 Elektriksel direnç ölçümü 67
3.3.2.5 Ağırlıkça su emme deneyi 67
4. DENEY SONUÇLARI, BULGULAR VE TARTIŞMA 69
4.1 Taze Harç Deney Sonuçları 69

4.2 Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları 70
4.2.1 Eğilme dayanımı 70
4.2.2 Basınç dayanımı 72
4.2.3 Ultra ses geçiş hızı 74
4.2.4 Elektiriksel direnç 76
4.2.5 Ağırlıkça su emme 78
4.3 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 79
4.4 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 83
4.4.1 Eğilme dayanımı - basınç dayanımı İlişkisi 84
4.4.2 Ultra ses hızı - eğilme dayanımı ilişkisi 85
4.4.3 Ultra ses hızı - basınç dayanımı ilişkisi 86
4.4.4 Elektriksel direnç – eğilme dayanımı ilişkisi 87
4.4.5 Elektriksel direnç – basınç dayanımı ilişkisi 88
4.5 Maliyet Analizi 89
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 93
5.1 Sonuçlar 93
5.2 Öneriler 94
KAYNAKLAR 97
ÖZGEÇMİŞ 105

KISALTMALAR

ASR **:** Alkali Silika Reaksiyonu
ASTM **:** Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu
BFS **:** Blast Furnace Slag
KK **:** Kızdırma Kaybı
MPa **:** Mega Paskal (N/mm^2)
PÇ **:** Portland Çimentosu
TS **:** Türk Standartları
YFC **:** Yüksek Fırın Cürufu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonu (Onat, 1998)..... 10
Çizelge 1.2 : ASTM C 989 (1994)'a göre, beton katkı maddesi olarak kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri 25
Çizelge 1.3 : Katı ve sıvı fazda sodyum silikatın özellikleri 31
Çizelge 3.1 : Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi 53
Çizelge 3.2 : Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri 54
Çizelge 3.3 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriği 54
Çizelge 3.4 : CEN standart kumu tane büyüklüğü dağılımı 56
Çizelge 3.5 : Krom cürufunun kimyasal içeriği 56
Çizelge 3.6 : Karıştırıcı paletin hızları 58
Çizelge 3.7 : Karışım oranları (I. Aşama) 61
Çizelge 3.8 : Karışım oranları (II. Aşama) 62
Çizelge 3.9 : Karışım oranları (III. Aşama) 63
Çizelge 4.1 : Birim ağırlık ve yayılma tablası deneyi sonuçları 69
Çizelge 4.2 : Eğilme dayanım değerleri (MPa) 70
Çizelge 4.3 : Basınç dayanım değerleri (MPa) 72
Çizelge 4.4 : Ultra ses geçiş hızı değerleri (m/s) 74
Çizelge 4.5 : Elektiriksel direnç değerleri (m/s) 76
Çizelge 4.6 : Ağırlıkça su emme oranları (%) 78
Çizelge 4.7 : 28. gün eğilme ve basınç dayanımları 84
Çizelge 4.8 : 28. gün eğilme dayanımı ve ultra ses hızı değerleri 85
Çizelge 4.9 : 28. gün ultra ses hızı ve basınç dayanım değerleri 86
Çizelge 4.10 : 28. Gün eğilme dayanımı ve elektriksel direnç değerleri 87
Çizelge 4.11 : 28. Gün basınç dayanımı ve elektriksel direnç değerleri 88
Çizelge 4.12 : "A" harcının maliyet analizi ($1m^3$ için) 89
Çizelge 4.13 : "D" harcının maliyet analizi ($1m^3$ için) 89
Çizelge 4.14 : "G" harcının maliyet analizi ($1m^3$ için) 90
Çizelge 4.15 : "Kontrol 1" harcının maliyet analizi ($1m^3$ için) 90
Çizelge 4.16 : "Kontrol 2" harcının maliyet analizi ($1m^3$ için) 90
Çizelge 4.17 : Maliyet analizi yapılan harçların basınç dayanımları 91

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Cürufun camsı yapısının şematik açıklaması (Tokyay, 2003) 11
Şekil 1.2 : Sodyum hidroksit çözeltisinin, seyrelti sıcaklıkları 27
Şekil 1.3 : Sodyum karbonat çözeltisi faz diyagramı 29
Şekil 2.1 : ASR-YFC ilişkisi 34
Şekil 2.2 : Geçirimlilik katsayısı - YFC ilişkisi..... 35
Şekil 3.1 : Harç üretiminde kullanılan karıştırıcı 57
Şekil 3.2 : Tipik harç kalıplarının boyutları (mm)..... 58
Şekil 3.3 : Çalışmalarda kullanılan kalıplar..... 59
Şekil 3.4 : Yayılma tablası ve kesik koninin boyutları (mm)..... 64
Şekil 3.5 : Eğilme dayanımı tayini için yükleme düzeneği (mm) 65
Şekil 3.6 : Ultrasonik test aygıtı 66
Şekil 3.7 : Direnç ölçüm düzeneği..... 67
Şekil 4.1 : Yayılma çapı değerleri 69
Şekil 4.2 : Karşılaştırmalı eğilme dayanım değerleri 71
Şekil 4.3 : Karşılaştırmalı basınç dayanım değerleri..... 73
Şekil 4.4 : Karşılaştırmalı ultra ses dalgası hızları 75
Şekil 4.5 : Karşılaştırmalı elektiriksel direnç değerleri 77
Şekil 4.6 : Su emme oranlarının karşılaştırmalı grafiği..... 78
Şekil 4.7 : Aşama I'de üretilen numunelerin kesitleri 80
Şekil 4.8 : Aşama II ve Aşama III'de üretilen numunelerin kesitleri..... 81
Şekil 4.9 : Eğilme dayanımı-basınç dayanımı grafiği 84
Şekil 4.10 : Ultra ses hızı – eğilme dayanımı grafiği 85
Şekil 4.11 : Ultra ses hızı – basınç dayanımı grafiği..... 86
Şekil 4.12 : Elektriksel direnç – eğilme dayanımı grafiği 87
Şekil 4.13 : Elektriksel direnç- eğilme dayanımı grafiği..... 88

ALKALİLERLE AKTİVE EDİLEN ÇİMENTO ESASLI MALZEMELERİN BASINÇ DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, belirli su/bağlayıcı oranında yüksek fırın cürufları farklı alkalilerle aktive edilerek basınç dayanımları incelenmiştir. Karışımlarda bağlayıcı olarak; çimento ve yüksek fırın cürufu, aktivatör olarak; sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH), agrega olarak; CEN standart kumu ve krom cürufu kullanılmıştır.

Öncelikli olarak; sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) alkalilerinin karşılaştırılmasını yapabilmek için aynı Na^+ konsantrasyonunda (YFC kütlesinin %5'i kadar Na^+ molekülü olacak şekilde) harçlar üretilmiştir. Bu harçların ilk bölümünde; bağlayıcı olarak sadece YFC, ikinci bölümünde; bağlayıcı olarak %75 YFC - %25 çimento kullanılmıştır. Harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı ve basınç dayanımı incelendiğinde, sadece çimento ile üretilen şahit numuneye en yakın mekanik dayanımı %100 YFC ile üretilip, sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilen harcın gösterdiği belirlenmiştir.

Çalışmaların sonraki bölümünde sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilen harçların özellikleri mercek altına alınmıştır. Bu harçlarda ilk olarak uygun Na^+ konsantrasyonu belirlenmeye çalışılmış, Na^+/YFC kütle oranı "%2,5", "%5", "%7,5" ve "%10" olan harçlar üretilmiştir. 7 ve 28 günlük basınç dayanımları en uygun Na^+/YFC oranının %5 olduğunu belirlenmiştir.

Ayrıca ilk değerlendirmelerde alkalilerle aktive edilen harçların 7 günlük basınç dayanımlarının düşük olduğu gözlenmiştir. Erken yaş dayanımını artırmak için harçlar ilk 3 ve ilk 7 gün olmak üzere sıcak kür suyunda bekletilmiştir. Sıcaklıkları 40 ºC, 60 ºC ve 80 ºC ile değişen kür havuzlarında bekletilen numuneler daha önce 20 ºC'de kürlenen numunelerle karşılaştırılmıştır. Sıcaklıkla ve sıcak kür havuzunda bekletilme süreleriyle doğru orantılı olarak basınç dayanımlarının arttığı gözlenmiştir.

Krom cürufunun agrega olarak kullanıldığı harç tiplerinde, bağlayıcı olarak YFC kullanılmış ve su/bağlayıcı oranı 0,5 ve 0,3 olmak üzere çeşitlendirilmiştir. Bu harçların 28. gün basınç ve eğilme dayanımları CEN standart kumu ile üretilenlerden daha fazladır.

Üretilen tüm harçların mekanik davranışları göz önüne alınarak, inşaat sektöründe kullanılmaya uygun olan harç tiplerinin maliyet analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Neticede krom cürufu agregasıyla üretilen harçların daha ekonomik olduğu belirlenmiştir.

Bu sonuçlar çerçevesinde sanayi atığı olan YFC - krom cürufu kullanılarak ve yine sanayide yan ürün olarak değerlendirilen sodyum hidroksit ile aktive edilerek daha ekonomik ve daha çevreci bir harç tipi üretilmesinin mümkün olduğu söylenebilir.

STRENGTH PROPERTIES OF ALKALIS ACTIVATED CEMENT BASE MATERIALS

SUMMARY

Blast furnace slag that occurs during iron and steel production, has a wide range usage in terms of building materials. BFS can be used as a subsitute to fine agreggate in case it is in a granular structure. If BFS has amorphous structure, it can be used in order to produce slag cement by grinding with clinker. In additon to this property of BFS with amorphous structure it can also utilized as admixture of concrete by a very fine grinding.

Studies showed that BFS can be utilized instead of cement if it is activated with high ratio of alcalines. BFS usage increases concrete's performance under chemical effects and workability and also decreases permeability. BFS increased strength against sulfate impact which is a major problem of marine structures.

It is stated that while using BFS take precautions against carbonation of concrete, if you are pouring concrete during cold weather add hardening accelarator, increase the ratio of air entraining admixture again freeze-thaw impact. It is not recommended to use BFS in early age resistance expected places or special precautions should be taken if early age resistance is expected.

BFS usage is recommended to widened in Turkey. The rise of demand to enviroment friendly structures triggered the increase of "Green Buildings" number. %80 BFS containing cements are started to use in this type of buildings. It is established that there has to be standard of BSF usage as a cement and concrete admixture. By using BFS an industrial waste would be used profitable, enviromental pollution would be prevented and also there would be a contribution to country economics.

Usage of industrial waste in construction sector as a addtional or a subsitute material is going to improve çivil engineering and open new doors for it. This opinion was tried to strengthened by our studies.

Compressive strength of blast furnace slags with accurate ratio of water/binder activated with different alkalis was investigated in this research. Cement and blast furnace slag were used as a binder; sodium silicate, sodium carbonate and sodium hidroxide were used as an activator; CEN reference sand and chrome slag were used as an agrega in mixtures.

Appropriate amount of alkaline activators were added mixing water in and shaked or mixed until deriving a homogenous solution during preparing mortars. Sodium silicate (Na_2SiO_3) were utilized in liquid form in whole studies. Avoided of occuring differences in water/binder ratios by consulting water molecules in sodium silicate (Na_2SiO_3).

As is known sodium hidroxide (NaOH) enter a exothermic reaction with water and large amount of heat occurs when sodium hidroxide completely dissoved in the water. The heat that occured, causes significant rise of temperature of mixing water.

Waited for derive a solution at room temperature after dissolving of sodium hidroxide (NaOH) in order to prevent thermal difference of mixing water.

Mortars were produced on the basis of TS EN 196-1 (2009) and inserted in standard mortar forms with dimensions of 40x40x160 mm. Before inserting in the mortar forms fresh mortar tests were carried out as described TS EN 1015-3 (2000). Samples that were waited in forms for average 24 hours, kept in curing pools. Mass production of all types of mortars were completed and compressive and bending strength tests of these mortars were carried out as described in TS EN 196-1 in 7^{th} , 28^{th} and 90^{th} days.

Primarily, mortars with same concentration of Na^+ (Na^+ molecules are to be %5 amount of BFS's mass) were produced in order to mix sodium hidroxide (NaOH), sodium carbonate (Na_2CO_3) and sodium silicate (Na_2SiO_3) alkalines. First part of these mortars; only BFS was used as binder, in the second part of mortars %75 BFS - %25 cement were used as binder. According to results of compressive and bending strength tests in 7^{th} , 28^{th} and 90^{th} days, mortar that was activated with sodium hidroxide (NaOH) and produced with %100 BFS, was indicated the nearest mechanical properties to only cement used specimen mortar.

Strength of mortars that were produced with sodium silicate (Na_2SiO_3) activator, are very low. Though mortars that were produced with %100 BFS gave better results than mortars produced with %75 BFS - %25 cement. The reason of this result is that sodium silicate's hardening accelarator affect on cement sophisticated mortars and vacuolar structure of mortars. This case was clearly observed in flow table test, unit weight test and water absoption test. In addition compressive and bending strength of %75 BFS - %25 cement activated systems decrease in case samples get older. Contrasting to all samples in this study and concrete material of this case was detected as result of highly vacuolar structure of mortar.

Compressive and bending strength of sodium carbonate (Na_2CO_3) activated mortars were very lower than specimen sample. On the other hand in contrast to other activators %75 BFS - %25 cement system provided higher strength in these mortars.

However the 28^{th} day compressive strength of sodium hidroxide (NaOH) activated mortar was very close to specimen sample, the 7^{th} and 90^{th} day compressive strength was lower than specimen sample. The impairment of early age compressive and bending strength is especially remarkable. On the other side strength of mortars that produced with %75 BFS – %25 cement is lower than mortars that were produced with %100 BFS.

As a result of first surveillance next sections of studies were focused on the mortars that activated with sodium hidroxide (NaOH). Optimum Na^+ concentration was tried to determined in these mortars. Mortars with "%2,5", "%5", "%7,5" and "%10" Na^+/BFS mass ratio were produced. 7^{th} and 28^{th} day compressive strength tests demonstrated that the mortar with %5 Na^+/BFS mass ratio has higher strentgh than the others. The order of the compressive strength of mortars is %5 > %7,5 > % 10 > %2,5.

In addition first evaluations showed that 7^{th} day compressive strength of alkaline activated mortars are low. In order to increase the early age strength of mortars a group in first 3 days and a group in first 7 days were kept in curing water. Samples that were kept in 40 ºC, 60 ºC and 80 ºC curing pool, were compared with samples that were kept in 20 ºC curing pool. The highest compressive strength was measured

at the the sample that was kept in 80 ºC curing pool in first 7 days. The order of compressive strength was 80 ºC > 60 ºC > 40 ºC. The rise of compressive strength is directly proportional with temperature and duration of keeping in hot curing pool. The most conspicuous result is 7^{th} day and 28^{th} day compressive strengths were approximately equal. Increasing temperature accelerates the actvation speed was determines as a result.

Studies of BFS-Sodium hidroxide (NaOH) mortars were continued by diversing aggregate. Chrome slug that was generated during ferrechrome production instead of CEN reference sand. In this way, more economical and more enviroment-friendly mechanical behaviours were investigated. BFS was used as binder and diversification of 0,5 and 0,3 water/binder ratio, except specimen sample, were used in whole mortars. Super plasticizer was added in a ratio of %2 of binder in mortars that has 0,3 water/binder ratio in order to raise the processability. The 28^{th} day compressive and bending strength of these mortars are higher than CEN reference sand . Early age strengths are demonstrated similarity to CEN reference sand and produced mortars. Mortars that produced with chrome slag were demonstrated highest compressive strengths in 0,3 ratiod water/BFS samples and samples which were kept in 80 ºC curng pool. İt is observed that aggerate differences do not effect unit results of weight test and flow-table test. In addition mortars that chrome slag was used as aggerate have higher bending strength.

All produced mortars were compared according to mechanical behaviours and cost analysis in construction sector. As a result of this, it is determined as mortars that are produced with chrome slag aggregate, are more economical.

According to these results, more economical and more enviroment-friendly type of mortar can be produced by using BFS-Chrome Slag which are industrial waste.

In addition to determining compressive and bending strength of these mortars, the correlation between them are determined by appling ultrasonic wave speed test, electrical resistance measurement and water absorption test. Only the 28^{th} day test results were used in this study whic contains all types of mortars.

The formula is defined as "$R_c = 0{,}017 \cdot V - 39{,}832$" between ultrasonic speed and compressive strength with the correlation coefficient R=0,95. This correlation coefficient is remarkable.

The formula is defined as "$R_f = 0{,}0042 \cdot V - 10{,}829$" between ultrasonic speed and bending strength with the correlation coefficient R=0,85.

The formula is defined as "$R_c = 3{,}2033 \cdot R_f + 12{,}902$" between bending strength and compressive strength with the correlation coefficient R=0,88.

The formula is defined as "$R_f = 0{,}2342 \cdot k + 3{,}1035$" between electrical resistance and bending strength with the correlation coefficient R=0,78.

The formula is defined as "$R_c = 0{,}7686 \cdot k + 22{,}565$" between electrical resistance and compressive strength with the correlation coefficient R=0,70.

1. GİRİŞ

Beton, son yüzyıldır inşaat endüstrisinde kendisine geniş kullanım alanları bulmuş ve hala oldukça da yaygın olarak kullanılan en önemli yapı malzemesidir. Gün geçtikçe yüksek durabiliteye ve dayanıma sahip yüksek performanslı betonlar, özellikle malzemenin zor iklim koşullarına maruz bırakıldığı yapılardaki normal dayanımlı betonların yerini almaktadır (Türkmen, 2003).

Yüksek performanslı betonlara yönelik araştırmalara da paralel olarak, hem çevre kirliliği yapan endüstriyel atık malzemelerin değerlendirilmesi hem de daha ekonomik bir beton elde edilmesi amacıyla, taze ve sertleşmiş betonun hemen hemen bütün özellikleri, uygun katkılar kullanılarak değiştirilip iyileştirilebilmektedir. İşte bu amaçla, gerek kimyasal katkılar gerekse de puzolanik özelliklere sahip birçok doğal ve yapay malzeme, çok eski zamanlardan günümüze değin yapım alanında ve beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılmışlardır. Betonun temel bileşenlerinden biri olmayan bu malzemeler gelişen beton teknolojisinde, hem betonun dayanım ve durabilite özelliklerini değiştirmek hem de üretimde ekonomi sağlamak gibi amaçlarla oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu nedenle de bu tür puzolanik maddeler, mineral katkı maddeleri olarak da tanımlanır.

Betonda kullanılan mineral katkı maddeleri, Portland çimentosuna benzer mineralojik ve kimyasal bileşimler ile fiziksel özelliklere sahip olmalarına rağmen, büyük çoğunluğunun kendi başlarına bağlayıcılık yetenekleri yoktur. Bu nedenle, bunlar ikincil bağlayıcı maddeler olarak da anılmaktadırlar. Etkili bir dolgu malzemesi fonksiyonu da görebilen bu maddeler, puzolanik aktiviteleri nedeniyle hidratasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik göstererek, bağlayıcı hamur yapısını değiştirirler. Böylece, betonun çeşitli özellikleri iyileştirilip daha yoğun bir bağlayıcı hamurunun oluşması sağlanmakta, hatta uygun dozajda süperakışkanlaştırıcı kimyasal ve puzolanik aktivitesi yüksek mineral katkı maddeleri kullanmak suretiyle de, çok yüksek (f_{ck} > 100 MPa) mukavemetlere erişmek mümkün olabilmektedir.

Volkanik küller, traslar ve diatomlu toprak gibi malzemeler doğal puzolanlar, beton üretimi ile doğrudan ilgili olmayan bir endüstri kolunda yan ürün olarak elde edilen uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu gibi malzemeler ise yapay puzolanlar olarak bilinirler. Harç ve beton üretiminde genellikle ikincil bağlayıcı madde olarak Portland çimentosunun ağırlıkça yüzdesi oranında, çimentonun bir kısmı yerine veya ilave olarak bazen de çimentoya önceden karıştırılmak suretiyle katkılı çimentoların elde edilmesinde kullanılmaktadırlar.

Puzolanik özelliğe sahip, endüstriyel atıklardan birisi de granüle yüksek fırın cürufudur. Demir cevherleri, doğada, bu malzemelerin esasını oluşturan demiroksit bileşenlerinin yanı sıra küçük bir miktar silis, alümin, kükürt, fosfor, mangan gibi yabancı maddeleri de bünyesinde barındırmaktadır. Cevher içerisindeki demirin elde edilebilmesi için cevherin, içerdiği yabancı maddelerden arındırılması ve demiroksitin ayrıştırılarak içerisindeki oksijenin çıkartılması gerekmektedir. Bu işlemleri yerine getirebilmek amacıyla demir cevherleri, yüksek fırın adı verilen fırınlarda yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp, eritilmektedir. Bu fırınlarda yakıt olarak kok kömürü kullanılmakta olup, cevherin yabancı maddelerden arındırılması işleminde yardımcı bir hammadde (flux) olarak bir miktar kalker taşı da demir cevherleri ile birlikte ısıtılma işlemine tabi tutulmaktadır. Demir cevheri, kalker taşı ve kok kömürü, fırının üst ucundan sürekli olarak beslenmektedir. Fırındaki sıcaklık etkisiyle, kok kömürünün karbonu, cevherin demiroksitindeki oksijenle birleşip, karbonmonoksit ve karbondioksit gazları oluşturarak fırını terk ederken, geride, eriyik durumdaki demir ile birlikte, yine eriyik durumdaki kireç, kok kömürünün külü, silis, alümin ve diğer yabancı maddelerden oluşan ve "cüruf adı verilen malzeme topluluğunu bırakmaktadır. Eriyik malzemeler fırının alt ucunda toplanmaktadırlar. Yoğunlukları farklı olduğundan, eriyik malzemelerin alt bölümünü demir ve üst bölümünü cüruf oluşturmaktadır. Eriyik durumundaki demir ve cüruf, fırının alt ucundan ayrı ayrı çıkışlarla dışarı alınmaktadır.

Yüksek fırından eriyik bir durumda, atık malzeme olarak dışarı alınan cüruf yaklaşık 1500°C sıcaklıkta olduğundan, cürufun herhangi bir amaçla kullanımı, ancak soğutulmasından sonra mümkün olmaktadır.

Uygulanan soğutulma yöntemi ve hızına bağlı olarak, soğutulmuş duruma getirilen malzeme oldukça değişik yapısal karakteristikler göstermektedir. Normal atmosferik koşullarda yavaş soğutulan cüruflar, "havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu", su,

basınçlı hava ve buhar etkisiyle soğutulmuş cüruflar, "genleştirilmiş yüksek fırın cürufu" veya "köpürtülmüş yüksek fırın cürufu", genellikle bol miktarda suda, çok hızlı soğutulma işlemine tabi tutulan cüruflar da, kum taneleri gibi (en büyük boyutu yaklaşık 4 mm) parçacıklar oluşturduklarından, "granüle yüksek fırın cürufu" olarak anılmaktadır. Eriyik cürufun çok hızlı soğutulması işlemi, cürufa hem granüle hem de amorf (camsı) yapı kazandırmaktadır (Erdoğan, 1995).

Soğutma işleminin çok yavaş olmasından dolayı kazanmış oldukları kristal yapı nedeniyle, havada soğutulmuş olan cüruflar puzolanik özellik göstermezler. Kırıldıkları takdirde, ancak beton yapımında agrega ya da yol dolgu malzemesi olarak kullanılabilmektedir. Kontrollü miktarda su ya da basınçlı buhar ile soğutulan genleştirilmiş yüksek fırın cüruflarında da, soğutulma işlemi yeterince hızlı olmadığından, kristal yapı hakimdir ve hidrolik bağlayıcılık özellikleri bulunmamaktadır. Genleştirilmiş cürufların kırılmasıyla hafif agrega elde edilebilmekte ve bunlar hafif beton yapımında kullanılabilmektedir. Öte yandan, büyük miktarda silis ve alümin içeren ve amorf yapıya sahip olan granüle yüksek fırın cürufları, öğütülerek çok ince taneli duruma getirilmeleri durumunda, puzolanik özellik göstermektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı olarak görev yaptıkları değişik kullanım tarzları mevcuttur. Yani,

1. Hidrolik bağlayıcı madde olarak, doğrudan, kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirilerek,

2. Cüruflu çimento üretiminde, Portland çimentosu klinkeri ve küçük miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülerek,

3. Beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak kullanılabilmektedir.

İnce taneli durumdaki granüle yüksek fırın cürufunun, kalsiyum hidroksitle ve suyla birleşmelerinden elde edilen hidrolik bağlayıcılık özelliği 1774 yılından bu yana bilinmektedir. Bu malzemeyle elde edilen bağlayıcılar 1889 yılında Paris metrosunun inşaatında kullanılmıştır. Ancak, günümüzde bu kullanım tarzı yok denecek kadar azdır.

Yüksek fırın cürufunun, Portland çimentosu klinkeriyle öğütülerek cüruflu çimento elde edilmesi, oldukça eskiye dayanan bir uygulamadır. İlk cüruflu çimentolar, Almanya'da 1892'de, ABD'de 1896'da üretilmeye başlanmıştır. Halen, Türkiye'de ve birçok ülkede cüruflu çimento üretilmektedir.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton katkı maddesi olarak kullanılması, Güney Afrika'da, 1947-1953 yılları arasında yapılan araştırmalardan sonra başlamıştır. Cürufun optimum inceliğe getirilmesi, cüruflu çimentoların depolama sorunları ve değişik koşullarda kullanılacak beton karışımlarının hazırlanmasındaki esneklik gibi faktörler, cürufun ayrı öğütülerek beton katkısı olarak kullanımını daha avantajlı kılmaktadır (Öner, 2001). Ancak, Türkiye'de cürufun ayrıca öğütülerek beton katkı malzemesi olarak kullanılması son bir-iki yıldan bu yana ve çok az miktardadır (Erdoğan, 2003).

1.1 Puzolanlar

ASTM C 125 (1994) ve ASTM C 618 (1994)'e göre puzolanlar, kendi başına bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak ince öğütüldüğünde ve rutubetli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girdiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan silisli ya da silisli ve alüminli malzemelerdir. Esas oksitleri olan silis ve alümine ilave olarak yapılarında demir oksit, kalsiyum oksit (CaO), alkali ve karbon bulunmaktadır. Bu maddelerin miktarları ise elde edildikleri kaynağa göre değişmektedir.

Puzolanların kullanımı yaklaşık olarak bundan 2000 yıl önce eski Romalılar döneminde başlamıştır. Bugünkü İtalya'da Vezüv yanardağı eteklerinde bulunan Pozzuoli kasabasında, volkanik küllerin su ve söndürülmüş kireçle karıştırıldığında bağlayıcı bir madde olduğu ilk kez Romalılar tarafından fark edilmiştir (Erdoğan, 1995).

Soroka (1993) puzolanlar genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrır. Birinci gruptaki puzolanlar doğal olarak ortaya çıkan malzemeler olup elde edilişleri genellikle kırma, öğütme ve eleme ile sınırlıdır (Bilim, 2006). Volkanik camlar, volkanik tüfler, diatomlu topraklar, traslar ve bazı killer bu gruba giren doğal puzolanlardır. Bir diğer grup puzolan da yapay puzolanlar olup bunlar bazı endüstri kollarında yan ürün olarak ortaya çıkan malzemelerdir. Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufları en yaygın olarak kullanılan yapay puzolanlardır.

1.1.1 Puzolanik reaksiyon

Ana bileşenleri silis olan puzolanların içerisindeki silis ve alümin, nemin varlığında ve ince öğütülmüş formda alkalilerle kimyasal olarak reaksiyona girerek bağlayıcı

özellik gösterirler. Reaksiyonun devam edebilmesi ve alkali çözeltileri ile geniş bir yüzey alanın teması için, puzolanların ince öğütülmüş formda olması gerekmektedir (Newman ve Choo, 2003; Bilim, 2006). Puzolan ve Portland çimentosu karışımı hidratasyona girince puzolanik reaksiyon etkisiyle bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Buna göre belli bir sürenin sonunda, puzolan içeren betonların çimento hamurunda Portland çimentosunun hamuruna oranla daha az serbest kireç ve daha çok kalsiyum silika hidrat (C-S-H) ürünü bulunmaktadır. Puzolan içeren betonlarda daha çok bağlayıcı ürün olan C-S-H jellerinin bulunması, dayanım artışına neden olurken hamur boşluk yapısının iyileşmesi neticesinde betonun dış etkilere dayanıklılığı da artmaktadır (Özturan, 1991).

Nemli ortamda ve ince öğütülmüş formda, puzolanın silisi ile kalsiyum hidroksit arasında meydana gelen reaksiyon basitçe CH + S + H — C-S-H (kalsiyum silika hidrat) şeklinde gösterilebilir. Bu reaksiyon yavaş bir reaksiyondur ve çimento kimyasında C = CaO, S = SiO_2, H = H_2O ve CH = $Ca(OH)_2$ olarak gösterilmektedir. Kireç puzolan reaksiyonunun C-S-H haricinde diğer ürünleri ise kalsiyum-alümine-hidrate, hidrate olmuş gehlenit, kalsiyum karbo alüminat, kalsiyum alümina monosülfat ve etrengittir (Erdoğan, 1997).

1.1.2 Puzolanik aktiflik

Bir beton karışımındaki puzolanın hidrate olmuş kireçle arasındaki reaksiyonun ne kadar iyi olduğu puzolanik aktivite ile tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle puzolanik aktiflik, kalsiyum hidroksitle, alümina silikatlar arasında oluşan ve sonucunda bağlayıcı özelliği olan hidratasyon ürünü meydana getiren reaksiyona işaret etmektedir (Erdoğan, 2002). Bir puzolanın Portland çimentosu betonu içinde kullanılabilmesi için değeri test ile ölçülebilen ve yeteri derecede puzolanik aktifliğe sahip olması gerekir. Puzolanik aktivitenin ölçülmesi için birçok metodun önerilmesi ve tavsiye edilmesine rağmen bunlardan hiç biri tamamen doyurucu olarak göz önüne alınmamaktadır. Çimento bağlayıcılı bir karışımın dayanımının, sadece bağlayıcının özelliklerine bağlı olmayıp normal test metotları ile anlaşılamayan birçok değişik faktöre bağlı olması, yukarıda bahsedilen testlerin yetersizliğinin esas nedenleridir.

Puzolanik malzemelerin, söndürülmüş kireç ve su ile ne ölçüde reaksiyona girip bağlayıcı özellik gösterebileceği ve çimento ile kullanıldığında kabul edilebilir bir

dayanım gelişmesi sağlayıp sağlayamayacağının tespitinde dayanım aktivite indisi deneyi kullanılır. ASTM C 311 (1994)'e göre, iki ayrı harç karışımı hazırlamak sureti ile puzolanların dayanım aktivite indisleri hesaplanır. Kontrol karışımının hazırlanmasında, 1 kısım çimento, 2,75 standart kum ve 0,485 su/bağlayıcı oranları kullanılarak, 5 cm boyutlarında küp numuneler elde edilir. Denenecek karışım ise, kontrol karışımındaki çimentonun %20 oranında puzolanik malzeme ile yer değiştirilmesi sonucu elde edilir. Denenecek karışımdaki su miktarı ise kontrol karışımının gösterdiği akmayı sağlayabilecek su miktarı olarak alınır (Bilim, 2006).

Hazırlanan numuneler, dayanımları bulunmadan önce, kirece doygun su içinde deney gününe kadar kür edilir. Kür sıcaklığı 23 ∓ 2ºC olmalıdır. Küp numuneler, 7. ve 28. günlerin sonunda basınç dayanımı deneyine tabi tutularak, kontrol ve denenecek karışımlar için dayanımlar bulunur. Herhangi bir zaman için her karışımdan 3 örnek test edilir. Dayanım aktiflik indisi denklem **(1.1)**'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\text{Dayanım aktiflik indisi} = (A/B)*100 \qquad \textbf{(1.1)}$$

A: Puzolanlı denenecek karışıma ait örneklerin ortalama basınç dayanımı
B: Kontrol karışımına ait örneklerin ortalama basınç dayanımı

1.1.3 Puzolanların kullanım amacı

İnce öğütülmüş formdaki puzolanlar, beton karışımına ilave edilecek çimentonun ya da ince agreganın bir kısmı (bu oran kullanım amacına göre ayarlanır) ile yer değiştirme sureti ile kullanılır. Puzolanlar, betonda işlenebilirliği ve perdahlamayı iyileştirmek (eğer karışım içindeki ince malzeme miktarı yeterli değilse), kanamayı ve ayrışmayı (segregasyon) azaltmak, hidratasyon ısısını azaltmak, alkali-silika reaksiyonu sonucu meydana gelen zararlı hacim genleşmelerini azaltmak, geçirgenliği azaltmak, nihai dayanımı arttırmak, sülfata karşı dayanıklılığı arttırmak (deniz suyu, sülfatlı zeminlerin ve doğal asitli suların etkili saldırılarına olan dayanımı) ve beton yapım maliyetini ve betonlama işleminin masraflarını azaltmak gibi amaçlarla beton içerisinde kullanılmaktadırlar (Erdoğan, 1997). Ancak, belli bir mineral katkının beton özelliklerine olan etkisinin, o katkının inceliğine, bileşimine ve kullanıldığı miktarına bağlı olduğu da unutulmamalıdır.

1.2 Yüksek Fırın Cürufları

1.2.1 Önbilgi

Demir çelik ve bazı metallerin üretiminde olduğu gibi, elde edilmek istenen esas ürünün yanında, atılmak üzere bazı yan ürünler de ortaya çıkmaktadır. Yan ürün veya atık olarak elde edilen ve büyük miktarlara ulaşan bu malzemelerden kurtulabilmek, bunları depolamak veya atmak, çoğu kez büyük güçlükler yaratmakta, toplum ve çevre için yeni sorunların kaynağı olabilmektedir. Oysa atık olarak elde edilen bu ürünlerin malzeme özellikleri incelendiğinde bu malzemelerden bazılarının belirli miktarlarda da olsa inşaat endüstrisinde kullanılabileceği görülmektedir.

Çeşitli metalürji tesislerinden elde edilen yan ürünlerden birisi de, ham demirin üretimi esnasında atık madde olarak ortaya çıkan cüruflardır. Cürufların kimyasal kompozisyonları ve özellikleri, elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim tekniğine de bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir. Örneğin, yüksek fırın cüruflarının kendi başına da bağlayıcılık özelliği olmasına karşın, bakır ve nikel cürufları sadece puzolanik özellik gösterirler (Tokyay, 2003).

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 granüle 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 (amorf) yapıya sahip olduklarından, bunları çimentolu sistemlerde kullanmak mümkündür. Tüm cüruflar arasında en önemlisi ve en yaygın kullanım alanına sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır.

1.2.2 Yüksek fırın cüruflarının üretimi

Yüksek Fırın cürufları, yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında endüstriyel bir yan ürün olarak üretilir.

Demir cevherleri, hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4), limonit ($Fe_3O_4.nH_2O$) ve siderit ($FeCO_3$) gibi demiroksit bileşenlerinin yanı sıra aynı zamanda küçük bir miktar silis, alümin, kil, kükürt, fosfor, mangan gibi yabancı maddeleri de bünyesinde barındırmaktadır (Doğulu, 1998). Cevher içerisindeki demirin elde edilebilmesi için cevherin, içerdiği yabancı maddelerden arındırılması ve demiroksitin ayrıştırılarak içerisindeki oksijenin çıkartılması gerekmektedir. Bu nedenle demir cevherleri, yüksek fırın adı verilen fırınlarda yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp, eritilirler.

Fırınlarda en yaygın olarak kullanılan yakıt kok kömürü olup, cevherin yabancı maddelerden arındırılmasına yardımcı olması için flux madde olarak bir miktar kalker taşı da cevherle birlikte üst uçtan fırına girmektedir. Kok kömürünün karbonu, cevherin içerisindeki demiroksitin oksijeniyle birleşerek karbondioksit ve karbonmonoksit olarak fırından ayrılır. Böylece, geride eriyik durumdaki demir ile birlikte, kireç, kok kömürünün külü, silis, alümin, karbon, mangan, fosfor ve sülfür gibi yabancı maddelerden oluşan ve "cüruf" adı verilen malzeme topluluğunu bırakır. Yoğunluk farkından dolayı, demir ve cüruf ayrı çıkışlarla dışarı alınmaktadır.

Fırından çıkarılan cüruf yaklaşık olarak 1400-1600°C sıcaklıkta olduğu için, kullanılmadan önce soğutulması gerekmektedir. Uygulanan soğutma tekniklerine de bağlı olarak cüruf farklı özellikler kazanmaktadır. Cürufun uygun bir forma getirilmesi ve bağlayıcı bir malzeme olarak kullanılması için granülasyon ve peletleme (hava granülasyonu) olmak üzere iki farklı yöntem mevcuttur. Her iki yöntemde de cürufun düzensiz bir camsı yapı kazanması için hızlı bir şekilde soğutulması esastır. Cürufun yavaş bir şekilde soğumasına izin verilmesi durumunda ise, bağlayıcılık değeri olmayan kristal bir yapı ortaya çıkmaktadır (Newman ve Choo, 2003). Taş gibi sert bir malzemeye dönüşen gri renkli ve kristal yapılı bu cüruflar, kırılarak agrega haline getirildiğinde, hidrolik bağlayıcılık özellikleri bulunmadığından, ancak yol dolgu malzemesi ya da beton agregası olarak kullanılabilmektedir.

Granülasyon yönteminde, camsı yapıdaki granüle yüksek fırın cürufun elde edilebilmesi, eskiden, basit olarak, eriyik cürufun su içerisine aniden daldırılması ile mümkün olmaktaydı. Ancak modern granülasyon yöntemlerinde ise, erimiş haldeki cüruf yüksek basınçlı su fıskiyelerinin 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. İşlem sonucunda cürufun içerdiği su miktarı yaklaşık olarak %30 civarındadır.

Ani olarak suya daldırma, basınçlı su püskürtülmesi veya peletleme yöntemleriyle granüle duruma getirilen cürufların içinde bulunan su, kurutucu değirmenler ya da filtreli havuzlar yardımıyla süzülmekte ve cüruflar, bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için 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 $Ca(OH)_2$ ile birleştirildiğinde hidrolik özelliğe sahip olur. Bu özellikleri nedeniyle, öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarını, cüruflu çimentoların üretiminde veya beton yapımında mineral katkı maddesi olarak kullanmak mümkün olmaktadır (Bilim, 2006).

1.2.3 Yüksek fırın cüruflarının inceliği

Granüle yüksek fırın cüruflarının bağlayıcılığı, inceliğiyle doğru orantılı olduğundan, Portland çimentosundan daha ince olacak şekilde en az 400 m^2/kg inceliğe kadar öğütülmelidir. (Newman ve Choo, 2003).

1.2.4 Yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonu

Yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonu yüksek fırının şartlarına ve ham maddelerin kaynağına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Newman ve Choo, 2003). Kimyasal yapılarında başta kireç, silika ve alümin olmak üzere az miktarlarda da demir, magnezyum ve kükürt bulunmaktadır. Değişik ülkelerde üretilen bazı cüruflara ait kimyasal kompozisyonlar, Portland çimentosununki ile birlikte karşılaştırmalı olarak Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1 : Yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonu (Onat, 1998).

	ABD & KANADA	GÜNEY AFRİKA	AVUSTRALYA	TÜRKİYE	PORTLAND ÇİMENTOSU
CaO	29 - 50	30 - 40	38 - 44	34 - 41	60 - 67
SiO_2	30 - 40	30 - 36	33 - 37	34 - 36	17 - 25
Al_2O_3	7 - 18	9 - 16	15 - 18	13 - 19	3 - 8
Fe_2O_3	0.1 - 1.5	-	0 - 0.7	0.3 - 2.5	0.5 - 6.0
MgO	0 - 19	8 - 21	1 - 3	3.5 - 7	0.1 - 4.0
MnO	0.2 - 1.5	-	0.3 - 1.5	1 - 2.5	-
S	0 - 2.0	1 - 1.6	0.6 - 0.8	1 - 2	-
SO_3	-	-	-	-	1 - 3

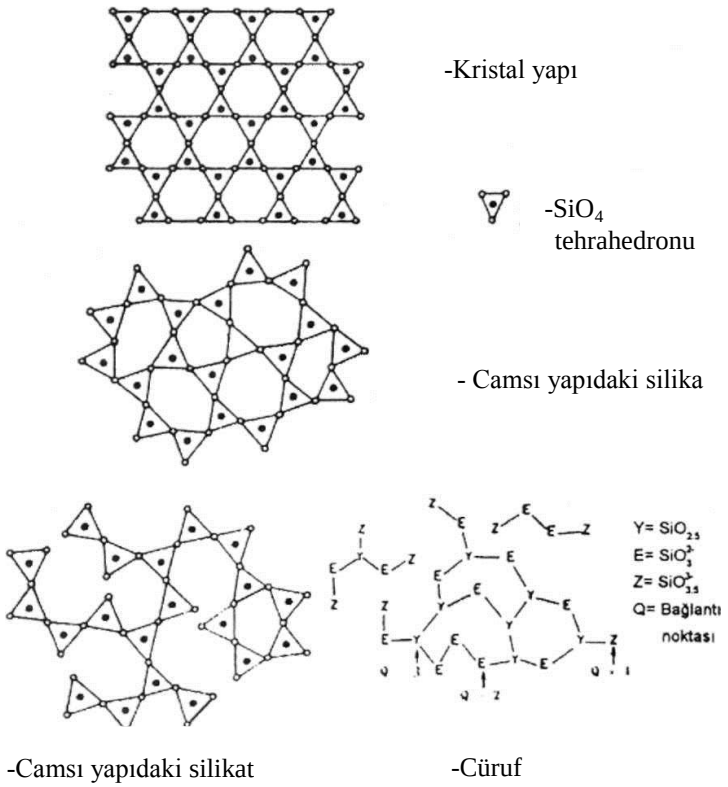
Granüle yüksek fırın cüruflarında kimyasal kompozisyon, hidrolik bağlayıcılık özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Bir granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık özelliği, belirli bir sınır değere kadar CaO/SiO_2 oranının artmasıyla artar. Ancak bu sınır aşıldığında, yani CaO miktarının çok yüksek olması durumunda granülasyon güçleşeceğinden hidrolik özellikte bir azalma ortaya çıkar. Sabit CaO/SiO_2 oranında, Al_2O_3 miktarının artması ise cüruf aktivitesini arttırır. Cüruf içinde yer alan demir ve mangan oksitler dayanım özelliğini olumsuz yönde etkiler. %10'a kadar MgO bulunmasının dayanıma kötü bir etkisi bulunmaz. Ancak daha yüksek MgO miktarları zararlı etkiler yaratabilir (Tokyay, 2003).

1.2.5 Yüksek fırın cüruflarının yapısı

Cüruf, bağlayıcılık özelliğini ancak ani soğutma yoluyla elde edilen camsı yapı sayesinde kazanmaktadır. Bu şekilde soğutulduğu takdirde atomlar kristal yapı oluşturacak zaman bulamadan düzensiz bir sistem, yani amorf (camsı) bir yapı oluştururlar.

Yüksek fırın cürufunun camsı yapısını önce kristal yapıdaki silika olan kuartzın yapısından yola çıkarak açıklamak mümkündür. Şekil 1.1'de kuartzın SiO_4 tetrahedronlarından oluşan düzgün kristal yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Bu yapıyı oluşturan tetrahedronların her köşesi birer başka tetrahedronla ortaktır. Camsı silikada, yukarıda belirtilen yapı, tetrahedronların düzgün ve birbirini düzenli olarak tekrarlayan şekilde dizilmesi, Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi bazı Si-O-Si bağlarının kırılması ve araya bazı metal katyonlarının girmesi nedeniyle bozulmuştur. Kristal yapıdaki her tetrahedronun dört köşede birer tetrahedrona komşu olması durumu camsı silikat yapısında 1-4 komşu tetrahedron bulunması haline dönüşmüştür. Artık,

üç boyutlu bir kafes yapıdan söz etmek mümkün değildir. Son olarak yine Şekil 1.1'de görülen camsı cüruf yapısında ise bazı Si konumları diğer atomlar tarafından işgal edilmiştir. Örneğin, Si^{+4} yerine Al^{+3} gelmesi, bir SiO_2'nin AlO_2 ile yer değiştirmesi anlamına gelmektedir. Bu durumda, nötr olan elektriksel yük eksi hale dönüşür. Nötr yapıyı sağlayabilmek için de araya magnezyum ve kalsiyum katyonları girer (Tokyay, 2003).



Şekil 1.1 : Cürufun camsı yapısının şematik açıklaması (Tokyay, 2003).

1.2.6 Yüksek fırın cüruflarının hidratasyonu

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları, su ile birleştirildiği takdirde, küçük bir miktar bağlayıcı özellik göstermektedir. Ancak, cürufların kendi başlarına suyla olan reaksiyonları, Portland çimentolarının hidratasyonuyla karşılaştırıldığında, oldukça yavaş geliştiğinden, cürufun bu tarz kullanımı pratikte çok yaygın değildir. Cürufun hidratasyonu, cürufun su içerisinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidrate alüminatlar, hidrate silika alüminatların çökelmesi olarak tanımlanabilir. Cüruf hidratasyonunun başlangıç aşamasında, silikat iyonları eriyiğe geçer, daha sonra, ilk C-S-H çökelmesinin ardından, eriyiğin kireç konsantrasyonu artar ve son olarak da alümina konsantrasyonunda, hidrate alüminat kristallerinin oluşumuna kadar, artış

görülür. Yüksek fırın cürufu hamurlarındaki hidrate fazların belirlenmesine yönelik bir araştırmada $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3\text{-}H_2O$ dörtlü sisteminde C-S-H, C_2ASH ve $C_4AH_{13\text{-}19}$ bileşenlerinin oluştuğu belirlenmiştir (Tokyay, 2003).

Granüle yüksek fırın cüruflarının kendi başlarına suyla yaptıkları reaksiyon, Portland çimentolarının hidratasyonuyla karşılaştırıldığında, oldukça yavaş geliştiğinden, araştırmacılar, ağır seyreden bu hidratasyon hızını yükseltebilmek için bu reaksiyonları hızlandıracak çalışmalara yönelmiştir (Tokyay, 2003). Yapılan çalışmalar cürufların; aktivatörlerle veya bir miktar Portland çimentosuyla birlikte kullanılabileceğini ve uygulamalarda kullanılabilecek güçlü bir çimento hamuru meydana getirmek amacıyla, alkali hidroksitlerin yalnız başlarına, yani Portland çimentosundan gelen kalsiyum hidroksit olmadan da, öğütülmüş yüksek fırın cüruflarıyla hidratasyona girebileceğini göstermiştir (Erdoğan, 1997).

Cürufların alkali aktivasyonunun mümkün olabileceği ile ilgili olarak yapılan çalışmalar 1940'lara kadar uzanmasına rağmen alkali aktive edilmiş cüruflu çimento ve betonlar, ilk kez 1957'de Ukrayna'da bulunmuştur. Diğer ülkeler de cürufun alkali aktivasyonu ile 1970'lerden sonra belirgin bir şekilde ilgilenmiş olup, son yıllarda alkali aktive edilmiş cüruflu çimento ve betonlar tüm dünya üzerinde büyük bir dikkat çekmeğe başlamıştır (Wang ve ark., 1995). Cürufların kimyasal aktivasyonu için kullanılan aktivatörleri iki ana grupta toplamak mümkündür : Alkaliler (soda, kireç, sodyum karbonat, sodyum silikat, vb) ve Sülfatlar (alçı, anhidrit, fosfojips, vb). Her iki grup malzeme de, cürufların hidratasyon ürünlerinin oluşumunu hızlandırmakta olup, bunlar yüksek fırın cürufuyla kimyasal reaksiyona girdiklerinde ortamın pH seviyesi artar. Kritik bir pH seviyesine ulaşıldığında ise, cürufun camsı yapısı bozularak reaktivite ortaya çıkar ve cüruf kendi bağlayıcı jellerini üreten suyla reaksiyona girmeye başlar (Newman ve Choo, 2003). Sodyum silikat çözeltisi ya da bir başka adıyla cam suyu, mukavemet ve diğer özellikler açısından granüle yüksek fırın cüruflarının aktivasyonunda kullanılan ve en iyi formülasyonu veren kimyasal aktivatördür. Ancak, uygulamadaki aktivasyon ise genel olarak, hem alkalileri (NaOH, $Ca(OH)_2$ ve KOH) hem de sülfatları içeren Portland çimentosunun granüle yüksek fırın cürufuyla birlikte karıştırılmasıyla elde edilmektedir (Bilim, 2006).

Portland çimentosu ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun su ile karıştırılması neticesinde, önce, Portland çimentosu klinkerinin (ve Portland çimentosunun) yapısında bulunan C_3S ve C_2S gibi kalsiyum silikatlı ana bileşenler reaksiyona

başlayarak, çimentoya hidrolik bağlayıcılık özelliği kazandıran $C_3S_2H_3$, kısaca C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jelleri ile birlikte $Ca(OH)_2$ (kalsiyum hidroksit) üretmeye başlamaktadır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, hidrolik bağlayıcılık kazanabilmek için ihtiyaç duyduğu bir miktar kalsiyum hidroksiti, Portland çimentosunun hidratasyon ürünü olarak ortaya çıkan bu kalsiyum hidroksitten sağlamaktadır. Granüle yüksek fırın cürufunun amorf yapıdaki silisi ve alümini, kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek, aynı Portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda olduğu gibi, bağlayıcı özellikteki yeni C-S-H jelleri gibi çok güçlü bağlayıcı karakteristiğe sahip hidratasyon ürünlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun Portland çimentosu ve su ile karıştırılması durumunda meydan gelen hidratasyon ürünlerinin, aslında Portland çimentosunun hidratasyona uğradığında gelişen esas ürünü ile aynı olduğu kabul edilmektedir (Erdoğan, 1997). Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kalsiyum hidroksitle hidratasyon reaksiyonları, puzolanlarınkine oldukça benzerdir.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun Portland çimentosu ile normal sıcaklıktaki reaksiyonu iki aşamada oluşmaktadır (Regourd, 1980; Roy ve Idorn, 1982). İlk aşamada, cüruf ile çimentodaki alkalilerden kaynaklanan alkali hidroksit arasında reaksiyonlar oluşmaktadır. İkinci aşamada ise, çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile cüruf arasındaki güçlü reaksiyonlar ortaya çıkmaktadır. Hidratasyon ısı hızının kalorimetrik çalışmaları da bu iki aşamalı etkiyi doğrulamaktadır; Portland çimentosunun hidratasyonunu, cürufun hidratasyonu takip etmektedir. Ortam sıcaklığı arttıkça, çimentodaki alkali hidroksitlerin çözünebilirliği de artmakta ve reaksiyonlar daha erken yer alabilmektedir (Erdoğan, 1995). Çimento, su ve cüruf arasındaki reaksiyonları **(1.2)** ve **(1.3)**'de ki gibi özetlemek mümkündür.

$$\text{Portland çimentosu} + \text{Su} \longrightarrow \text{C-S-H} + Ca(OH)_2 + \text{NaOH} + \text{KOH} \qquad \textbf{(1.2)}$$

$$\text{Granüle YFC} + \text{Su} + Ca(OH)_2 \longrightarrow \text{C-(N,K)-S-H} + \text{NaOH} + \text{KOH} \qquad \textbf{(1.3)}$$

1.2.7 Yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı özelliklerini etkileyen faktörler

Cürufun çimento ve beton üzerine etkisi, puzolanların etkilerine benzer olarak, büyük ölçüde cürufun sahip olduğu özelliklere bağlıdır (Soroka, 1993).

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının sahip olduğu ve betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılmaları durumunda bağlayıcı özelliklerini etkileyen bu faktörler aşağıda sıralanmıştır:

1.Cürufun kimyasal kompozisyonu

2.Ortam sıcaklığı

3.Cüruf içerisindeki camsı yapının miktarı

4.Cürufun ve birlikte kullanıldığı Portland çimentosunun inceliği

5.Reaksiyon yapan sistemdeki alkali konsantrasyonu

1.2.8 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının betonun özellikleri üzerine etkileri

Erdoğan (1995) cürufun ayrıca öğütülerek betonda mineral katkı olarak kullanılmasının beton özelliklerine yararları şu şekilde sıralamaktadır.

Cüruf katkılı betonlar;

1.İlk günlerde, sadece Portland çimentosu kullanılarak elde edilen betona göre, daha düşük dayanım göstermektedir; ancak, son günlerdeki dayanım yüksek olmaktadır.

2.Sülfatlı ortamlara ve deniz sularına karşı daha dayanıklıdır.

3.Yüksek miktarda cüruf kullanıldığı takdirde, alkali-silis reaksiyonundan kaynaklanan genleşmeleri daha az göstermektedir.

4.Klorür iyonlarının daha az sızabileceği, daha az geçirimliliğe sahiptir.

5.Yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklıdır.

1.2.8.1 Taze beton özellikleri zerine etkisi

Su ihtiyacı ve işlenebilirlik

Yüksek fırın cüruflu betonlar, aynı slump değeri için, Portland çimentoları ile yapılmış betonla kıyaslandıklarında, azaltma miktarı %3'ten fazla olmamasına rağmen, daha düşük su ihtiyacı gösterirler. Bu azalma, çoğunlukla, cüruf partiküllerinin pürüzsüz yüzey dokusuyla ve kimyasal reaksiyonlarda meydana gelen gecikmeyle ilgilidir (Newman ve Choo, 2003). Öte yandan, yüksek fırın cürufunun, klinkere göre, daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının

düşük olması, dolayısıyla hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesi, cüruf katkılı betonların işlenebilirliğinin olumlu yönde etkileneceğinin göstergeleridir.

Kanama - Kusma

Yapılan deneysel çalışmalarda, yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilmiş betonların, hem terleme hızlarının hem de terleme miktarlarının daha fazla olduğu saptanmıştır. Öte yandan, cürufun, betonun kanaması üzerindeki etkisi, kıyaslamaların yapıldığı birkaç ölçüye de bağlı olmaktadır. Sabit bir su/bağlayıcı oranında cüruf kullanılması durumunda (yaklaşık %40'tan daha büyük oranlarda), istisnasız olarak kanama artmaktadır. Ancak, kıyaslama 28 günlük mukavemet esas alınarak yapıldığında, farklılıklar öyle belirgin olmamaktadır.

Hidratasyon ısısı

Cürufların beton içerisinde kullanılması, hidratasyon 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.

Priz zamanı

Yüksek fırın cüruflarının, Portland çimentolarına göre su ile daha yavaş reaksiyona girmesinden dolayı, beton içerisinde cüruf kullanımı, betonun priz zamanında bir artışa neden olmaktadır. Kuruma zamanında meydana gelen bu uzama, %50'den yukarıdaki yüksek yer değişim seviyelerinde ve 10°C'den de düşük sıcaklıklarda daha fazla olmaktadır.

1.2.8.2 Sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkisi

Basınç mukavemeti ve mukavemet gelişimi

Eşit çimento miktarı ve eşit su/bağlayıcı oranları söz konusu olduğunda cüruf katkılı betonlar, normal Portland çimentosu içeren betonlara göre, erken yaşlarda nispeten düşük, geç yaşlarda ise daha yüksek beton dayanım değerlerine neden olurlar. Granüle yüksek fırın cürufları, Portland çimentolarına göre daha yavaş hidrate olduğundan, cüruflu betonların erken yaşlardaki mukavemet gelişim oranları daha

düşüktür. Yüksek miktardaki cüruf yer değişim oranları ise, daha düşük mukavemet gelişimine neden olmaktadır. Ancak, uygun bir nemli ortam sağlandığında, cüruflu betonların uzun dönem mukavemeti muhtemel olarak daha yüksek olacaktır. Bu daha yüksek son dönem mukavemeti, cürufun kısmen uzun süren mukavemetinden ve daha yavaş hidratasyon reaksiyonunun bir sonucu olarak meydana gelen daha yoğun hidrate olmuş mikro yapıdan ileri gelmektedir. Sıcaklık arttığı zaman, cüruf katkılı betonların dayanım kazanma oranında meydana gelen artış da, Portland çimentosu içeren betonlarınkinden daha fazla olmaktadır (Bilim, 2006).

Çekme mukavemeti

Cüruflu betonlar, verilen bir basınç dayanımı için Portland çimentolu betona göre biraz daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir (Newman ve Choo, 2003; Bilim, 2006).

Sünme

Nem kaybının olmadığı kür şartlarında, artan cüruf yer değişim oranı ile birlikte betonun sünmesi de azalmaktadır. %70 gibi daha yüksek yer değişim oranlarında, betonun sünmesinde meydana gelen azalmanın %50 civarlarında olduğu rapor edilmiştir (Newman ve Choo, 2003; Bilim, 2006). Sünmede meydana gelen bu azalmalar genel olarak, cüruf içeren betonların sonraki yaşlarda kazandığı daha yüksek mukavemet ile ilişkilidir. Kuru kür şartlarında ise, son dönemdeki mukavemet az olduğundan, sünmede görülen bu farklılık daha az belirgin olmaktadır. Kuruma rötresinin fazla olmadığı çoğu uygulamalarda, cüruf katkılı betonların sünme davranışı, muhtemelen Portland çimentoları ile yapılan betonlarınkine benzerdir.

Rötre

Cüruf katkılı betonların rötreleri konusunda yapılan araştırmaların sonuçları, deney koşulları ve kullanılan malzemelerin değişik olması nedeniyle, birbirlerinden farklılıklar göstermekle birlikte bu farklar çok önemli ölçüde değildir. Genel olarak ifade etmek gerekirse, cüruf içeren betonların Portland çimentosu içeren betonlara göre rötreyi daha değişik etkilemediği söylenebilir (Newman ve Choo, 2003; Wainwright, 1986 : Tokyay, 2003).

Elastisite modülü

Yüksek fırın cürufları, Portland çimentosu içeren betonlarla kıyaslandığında, verilen bir basınç mukavemeti için betonun elastisite modülünü biraz daha arttırıcı etkiye sahiptir (Newman ve Choo, 2003; Bilim, 2006).

1.2.8.3 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 tarifle 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).

Permeabilite

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

1.Cüruflu 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, cüruflu betonların boşluk yapısı bundan daha az etkilenmektedir.

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).

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.

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.

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 anlaşılmış değildir. Alkali-silika reaksiyonunu azaltmak için alınacak tedbirler arasında aşağıda belirtilen yöntemler kullanılabilir:

1.Kullanılacak agregaların reaktivitelerinin de göz önüne alınarak, bunların düşük, normal ve yüksek reaktiviteli olarak sınıflandırılması,

2.Betona, agrega reaktivitesine de bağlı olarak, %40 veya %50 ikame oranlarında cüruf katkısının yapılması,

3.Alkali miktarı az olan (<%0,6 Na_2O) düşük alkalili çimento kullanılması,

4.Minimum cüruf ikame oranının kullanıldığı yerlerde betonun toplam alkali içeriği hesaplanırken, cürufun alkali miktarının göz önüne alınmaması,

5.Betondaki toplam alkalilerin limitinin, agrega reaktivitesine de bağlı olarak, 2,5-5,0 kg/m^3 Na_2O aralığında olması.

Klor geçirgenliği

Cüruflu çimentolar ya da cüruf katkılı betonlar, klor iyonlarının betona girmesine karşı Portland çimentolarından daha dayanıklıdırlar. Bu olumlu etki, klor akışını azaltıcı etkiye sahip cüruf hidratasyon ürünlerinin klor iyonlarıyla kimyasal olarak birleşmesinden ve aynı zamanda cüruflu 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 cüruflu 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. Cüruflu 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).

Karbonatlaşma

Temiz hava içerisinde normal koşullarda %0,03 şehirleşmenin yoğun olduğu yerlerde ise havada %0,3 kadar karbondioksit (CO_2) bulunmaktadır. Çimentonun hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile havada bulunan karbondioksitin temas etmesi halinde kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) oluşmakta ve ayrıca bir miktar su açığa çıkmaktadır. Karbonatlaşma karbondioksitin beton içerisine girmesiyle meydana gelmektedir. Zamanla belirli bir kalınlıkta $CaCO_3$ tabakası oluştuktan sonra CO_2'in beton içersine girmesi zorlaşır ve bundan dolayı karbonatlaşma hızı yavaşlayarak devam eder. Karbonatlaşmanın gerçekleşme hızı; zamana, betonun geçirimliliğine, havadaki CO_2 ve nem miktarına bağlıdır.

Betonun, çeliği korozyona neden olacak zararlı sulardan 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 hemfikir olunan bir sonuç, cüruf içeren betonların karbonatlaşma direncinin arttırılabilmesi için bakım süresinin uzatılması gerektiğidir (Bilim, 2006).

1.2.9 Kürün yüksek fırın cürufu katkılı betonlar üzerindeki etkisi

Beton, hidratasyon olayına bağlı olarak zaman içerisinde dayanımını kazanır. Bundan dolayı ancak hidratasyon olayının kesintiye uğramadan devam ettiği veya herhangi bir yavaşlatıcı etkiye maruz kalmadığı ortamlarda tutulan beton istenen dayanıma ulaşabilir. Uygulanan kürün çeşidi, süresi ve sıcaklığı, bağıl nem, rüzgar, güneş gibi ortam koşulları, beton dayanımının gelişiminde rol oynayan önemli etkenlerdir. Betonun bileşimi içerisinde yer alan suyun buharlaşarak kaybolması, hidratasyon için gereken suyun yok olması ve dolayısıyla betonun gereken dayanımı kazanamaması ile sonuçlanır. Betonun boşluk miktarını istenen dayanım ve dayanıklılığı sağlayabilecek şekilde azaltacak yeterli hidratasyonun temini için gerekli nemin sağlanması şarttır. Yapılan araştırmalar, beton su içerisinde ne kadar uzun süre saklanırsa dayanımının da o kadar artacağını göstermektedir.

Uygulanan kür sıcaklığı da dayanımdaki gelişimi ve kür süresini etkilemektedir. Yüksek sıcaklıklarda hidratasyon hızlandığı için erken yaşlardaki mukavemet de artmaktadır. Ancak yüksek kür sıcaklığı ilerleyen yaşlardaki mukavemette bir düşüş meydana getirmektedir. Bu durumun muhtemel nedeni, yüksek sıcaklıklarda oluşan hidratasyon ürünlerinin beton içerisinde üniform tarzda yer alamamış ve böylece zayıf bölgeler meydana getirmiş olmasına bağlanmaktadır (Neville, 1981; Bilim, 2006). Öte yandan, betonun yeterli dayanıma ulaşabilmesi için uygulanan kürün süresi de önem teşkil etmektedir. Bu açıdan en uygunu, betonun beklenen dayanıma ulaşıncaya dek kür edilmesidir Ancak, bu uygulanması pek de mümkün olmayan bir durum olduğu için minimum kür süresinin ne kadar uzunlukta olmasına dair bazı öneriler bulunmaktadır. ACI 308 (1994), yedi günlük nem kürünü ya da dayanımın %70'inin kazanılabilmesi için gerekli zamanı, kür süresi olarak önermiştir. Donatısız

kütle betonları için iki, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkı maddeleri içeren betonlar için de üç haftalık kür önerilmektedir. Bu daha uzun kür süreleri, yüksek fırın cürufu gibi düşük hidratasyon ısısına sahip puzolan katkılı betonların daha yavaş hidrate olmalarından dolayı çimento-puzolan reaksiyonunun daha sağlıklı gelişebilmesi açısından gerekli olmaktadır.

1.2.10 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özellikli malzeme olarak kullanılmaya uygunluğu

Geçmiş yıllarda, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun yeterli bağlayıcılık gösterebilip gösteremeyeceğini araştırmak için, kimyasal kompozisyonunun **(1.4)**'de gösterilen koşulu sağlaması istenmekteydi.

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \geq 1 \qquad \textbf{(1.4)}$$

Ancak son yıllarda, uygun kimyasal kompozisyona sahip olabilmenin yeterli olmadığı görüşü ağırlık kazanarak, cürufun beton katkı maddesi olarak uygunluğunu belirlemek üzere cüruf aktivite indeksinin araştırılmasının daha gerçekçi bir yaklaşım olduğuna karar verilmiştir. Cüruf aktivite indeksini belirleyebilmek için, ABD'nin ASTM C 989 (1994) standardına göre, 242 ml su, 500 gr Portland çimentosu ve 1375gr standart kumdan oluşan cüruf katkısız kontrol harcı ile 250 gr Portland çimentosu, 250 gr cüruf, 1375 gr standart kum ve kontrol karışımının gösterdiği akmayı sağlayabilecek kadar sudan oluşan cüruf katkılı bir başka harç hazırlanmaktadır. Cüruf katkılı ve cüruf katkısız harçlardan hazırlanan 5 cm'lik küp numuneler, 7 ve 28 günlük yaşlarda basınç dayanımı deneyine tabi tutulmakta ve CP, cüruf katkılı harç küplerinin, P ise kontrol küplerinin ortalama basınç dayanımlarını göstermek üzere, **(1.5)** denklemine göre hesaplama yapılmaktadır.

$$\text{C.A.İ} = \text{Cüruf aktivite indeksi, (\%)} = CP/C \times 100 \qquad \textbf{(1.5)}$$

Cüruf aktivite indeksi, kullanılan Portland çimentosunun özellikleri tarafından etkileneceğinden, ASTM C 989 (1994), referans olarak kullanılması gereken Portland çimentosunun çimento standartlarına uygunluğunun yanı sıra bazı özelliklere de sahip olması gerektiğini bildirmektedir. Kullanılacak Portland çimentosunun 28 günlük basınç dayanımının en az 35 MPa olması ve bu çimentodaki

toplam alkalilerin ($Na_2O+0.658K_2O$) miktarının da en az 0,60, en çok 0,90 olması gerektiğini bildirmektedir (Erdoğan, 1995).

Yukarıda anlatılan yöntem, ASTM C 989 (1994)'a göre betonda katkı maddesi olarak kullanılacak cürufun aktivitesini bulma yöntemidir. Cüruflu çimento üretiminde kullanılacak cüruf aktivitesinin tayininde kullanılan yöntem ise ASTM C 595 (1993)'te anlatılmakta olup bu yöntemden farklıdır.

1.2.11 Yüksek fırın cüruflarının inşaat sektöründe kullanım alanları

1.2.11.1 Hafif beton agregası olarak kullanımı

Kontrollü miktarda su ile soğutulan ve içerisinde buhar hapsolması nedeniyle, genleşmeye uğrayarak gözenekli bir yapıya kavuşan cüruflar, kırıldıkları takdirde hafif agrega olarak, hafif beton yapımında kullanılabilmektedir. Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu agregalarının özgül ağırlığı, normal agregalarınkinden daha düşüktür. Bunun yanında, ısı yalıtımı, işlenme 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).

1.2.11.2 Yol malzemesi ve asfalt betonu agregası olarak kullanımı

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).

1.2.11.3 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 cüruflu çimentolar elde edilmektedir. TS 20 (1992), cüruflu çimentolar içerisindeki cüruf miktarını en az %20 ve en çok %80 olacak şekilde sınırlandırmıştır.

- 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).

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun cüruflu çimento üretiminde kullanımı

Cüruflu Portland çimentolarının üretimi, granüle yüksek fırın cürufunun, ya öğütülüp Portland çimentosuna ayrıca katılmasıyla, ya da Portland çimentosu klinkerine öğütülmeden katılarak bu malzemelerin birlikte öğütülmesiyle yapılmaktadır. Ama cüruflu Portland çimentolarının üretimi genellikle, granüle yüksek fırın cürufunun küçük bir miktar alçıtaşı ve Portland çimentosu klinkeri ile birlikte öğütülmesiyle gerçekleştirilmektedir.

Cüruflu Portland çimentolarının üretiminde kullanılacak granüle yüksek fırın cürufunun uygun özellikte olması gerekmektedir. Ancak Türk Standartları da dahil, bazı standartlarda, cüruflu 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, cüruflu çimentoların üretiminde kullanılacak granüle yüksek fırın cürufunun aktivite indeksi, 28 günlük numuneler için, en az %75 olmalıdır (Erdoğan, 1995).

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton yapımında mineral katkı olarak kullanımı

Cüruflu 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. Cüruflu 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, cüruflu çimentonun depolanma özelliğinden daha iyidir. Cüruflu 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.

1.2.12 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının beton katkı maddesi olarak kullanılabilirliğine dair standartların incelenmesi

ASTM C 989 (1994), beton yapımında mineral katkı olarak kullanılabilecek hidrolik özellikli öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarını, cüruf aktivite indeksini göz önünde tutarak, (kategori 80, kategori 100 ve kategori 120 isimleriyle) üç kategoriye ayırmaktadır. Bu sınıfların aktivite indeksleri, yarı yarıya hazırlanmış Portland çimentosu-cüruf karışımlarının kullanılmasıyla üretilen 5 cm'lik küpler yardımıyla bulunmaktadır. Standartta, bu cürufların 45 um göz açıklıklı elekten geçirildiklerinde, elek üzerinde kalan maksimum miktarının %20 olması ve bu cüruflarla yapılan harçların maksimum hava miktarının %12 olması belirtilmektedir. Çizelge 1.2'de öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının fiziksel özellikleri gösterilmiştir. Ayrıca, cüruflarda bulunan S (kükürt) ve SO_3 miktarları, sırasıyla, en çok %2.5 ve %4 olarak sınırlandırılmaktadır.

Çizelge 1.2 : ASTM C 989 (1994)'a göre, beton katkı maddesi olarak kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri.

İncelik;	
45 µm göz açıklıklı elek üzerinde kalan miktar	
maks, %	20
Cüruf Aktivite İndeksi (Beş numunenin ortalaması)	
min, %	
7 Günlük	
Sınıf 80	-
Sınıf 100	75
Sınıf 120	95
28 Günlük	
Sınıf 80	75
Sınıf 100	95
Sınıf 120	115

Beton ve harçta kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları için bir başka Standart da, ASTM C 1073 (1991) standardıdır. Bu standartta, cürufun hidrolik reaktivitesinin NaOH çözeltisi kullanılarak 24 saatte belirlendiği bir test yöntemi bulunmaktadır. Bunun dışında, ASTM C 595 (1993) adlı standartta da katkılı çimentolarda kullanılabilecek granüle yüksek fırın cüruflarına ilişkin koşullar genel olarak belirtilmiştir.

Çimento veya betonda kullanılabilecek granüle yüksek fırın cürufları ile ilgili herhangi bir Türk Standardı mevcut olmadığı gibi, Türk Standartları, beton katkı maddesi olarak kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarına ait herhangi bir değer vermemektedir.

Türkiye'de üretilen granüle yüksek fırın cüruflarının bir bölümü cüruflu çimentoların üretiminde kullanılırken, cürufun ayrıca öğütülerek beton yapımında mineral katkı olarak kullanılma yöntemi son bir iki yıldan bu yana ve çok az miktarda kullanılmaktadır. Uygun kalitedeki granüle yüksek fırın cürufunun ayrıca öğütülerek beton yapımında kullanılmasıyla, hem atıkların neden olduğu çevre sorunları hem de doğal kaynakların hızlı tüketimi azalacak, daha ekonomik ve daha iyi özelliklere sahip malzemelerin üretimi mümkün olabilecektir (Bilim, 2006)

1.3 Alkalin Aktivatörler

Çimento esaslı harçlarda ve beton üretiminde alkalin aktivatör olarak genellikle, alkalin tuzlar ve kostik alkaliler kullanılır. Bunlar kimyasal bileşimlerine göre altı grupta sınıflandırılabilinir. (Glukhovsky ve ark.,1980).

1. Kostik Alkaliler : MOH

2. Silikatsız zayıf asit tuzları : M_2CO_3, M_2SO_3, M_3PO_4, MF

3. Silikatlar : M_2O . $nSiO_2$

4. Alüminatlar : M_2O . nAl_2O_3

5. Alüminosilikatlar : M_2O . Al_2O_3 . $(2\text{-}6)SiO_2$

6. Silikatsız kuvvetli asit tuzları : M_2SO_4

Tüm bu aktivatörler arasında; sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sodyum silikat (Na_2O . $nSiO_2$) en kolay bulunabilir ve en ekonomik olan kimyasallardır. Bunun yanı sıra bazı potasyumlu bileşiklerde zor elde edilebilir ve pahalı olmasına rağmen laboratuvar çalışmalarında kullanılmıştır. Diğer yandan sodyum ve potasyum içerikleri oldukça benzerdir (Shi ve ark., 2006).

1.3.1 Sodyum hidroksit

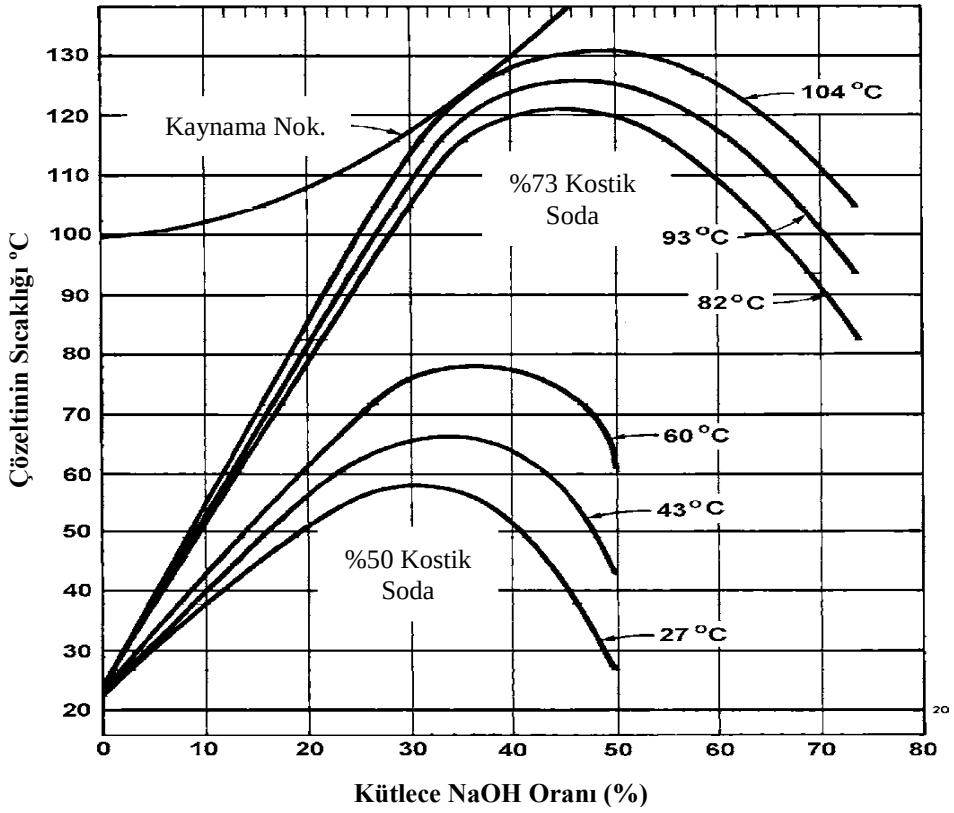
Sodyum hidroksit, kostik soda olarak da bilinir. Çok kuvvetli bir bazdır. Moleküler formulasyonu NaOH'tır. Sodyum hidroksit endüstri malzemesi olarak; kağıt üretimi, temizlik malzemesi, sabun üretimi, gıda sektörü, metal işleme, tarımsal ilaçlar, boya üretimi, tekstil vb. bir çok alanda kullanılır. 2004'te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

1.3.1.1 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 20ºC'de özkütlesi 2,13 gr/cm^3'tür. Erime sıcaklığı 318ºC ve kaynama sıcakığı 1388ºC'dir. Molar kütlesi ise 39,9971 gr/mol'dür.

Doygun çözeltilerinde altı farklı hidrat formu vardır; $NaOH.H_2O$, $NaOH.2H_2O$, $NaOH.3{,}5H_2O$, $NaOH.4H_2O$, $NaOH.5H_2O$ ve $NaOH.7H_2O$. 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.

Genellikle %50 NaOH konsantrasyonu, en kullanışlı ve ekonomik çözelti olarak kabul edilir. Şekil 1.2'de %73 ve %50 NaOH konsantrasyonunda sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanırken, sıcaklık değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 1.2 : Sodyum hidroksit çözeltisinin, seyrelti sıcaklıkları.

İstenilen konsantrasyonda çözelti elde etmek için denklem **(1.6)**'da ki hesaplama yapılabilinir.

$$D = A / C \cdot (B-C) \qquad \textbf{(1.6)}$$

Burada;

A: Çözeltinin yoğunluğu. (gr/cm^3)

B: Çözeltide ki NaOH konsantrasyonu (%)

C: İstenilen NaOH konsantrasyonu (%)

D: Eklenecek su miktarı (cm^3)

Bu hesaplama doğrultusunda istenilen çözeltiyi elde ederken iki önemli hususa dikkat edilmelidir. Her zaman sodyum hidroksit çözeltisi suya eklenmeli, su çözeltiye eklenmemelidir. Çözelti istenilen konsantrasyona getirilmeye çalışılırken kullanılan su 30ºC - 40ºC aralığında olmalıdır (Shi ve ark., 2006).

1.3.1.2 Harç ve beton üretiminde sodyum hidroksit kullanımı

Sodyum hidroksit çimentonun hidratasyonuda priz hızlandırıcı olarak kullanılır. Ancak 7. ve 14. gün basınç dayanımlarında düşük sonuçlar gözlemlenir. En genel kostik soda kullanımı suda tam çözünmüş haldedir. Çözünmemiş her bir sodyum hidroksit tanesinin tamamen çözünmesi sağlanarak oluşabilecek ani sıcaklık değişimlerinin önüne geçilmelidir. Hidratasyon hızlandırıcı olarak kullanılan en uygun çözelti yeteri kadar çalkalanmış ve ılık su kullanılarak elde edilendir (Shi ve ark., 2006).

1.3.2 Sodyum karbonat

Tüm alkali metal tuzları arasında sanayi açısından kuşkusuz en önemlisi, soda olarakta bilinen sodyum karbonattır. Moleküler formulasyonu Na_2CO_3'tür. Bu bileşik belirli deniz bitkilerinde ve bazı kayalarda mineral olarak bulunur. Bu mineral yatakları genellikle Afrika ve Asya'da dır. Önceleri La Blanc işlemiyle üretilen sodyum karbonat, günümüzde daha ucuz ve daha yalın olan Solvay işlemiyle üretilmektedir. Bu işlemde, doygun sodyum klorür çözeltisi, önce amonyakla, daha sonra da karbon dioksitle işlem görür. Bu tepkimenin ürünlerinden olan $NaHCO_3$ ısıtılarak; sodyum karbonatın, karbondioksitin ve suyun açığa çıkması sağlanır. Bu işlemle üretilen sodyum karbonata Solvay sodası denir. Solvay sodası cam üretiminde, sabun üretiminde, tekstil sektöründe, gıda sektöründe, temizlik malzemelerinde, tuğla yapımında vb. bir çok alanda kullanılır (Kostick, 1994).

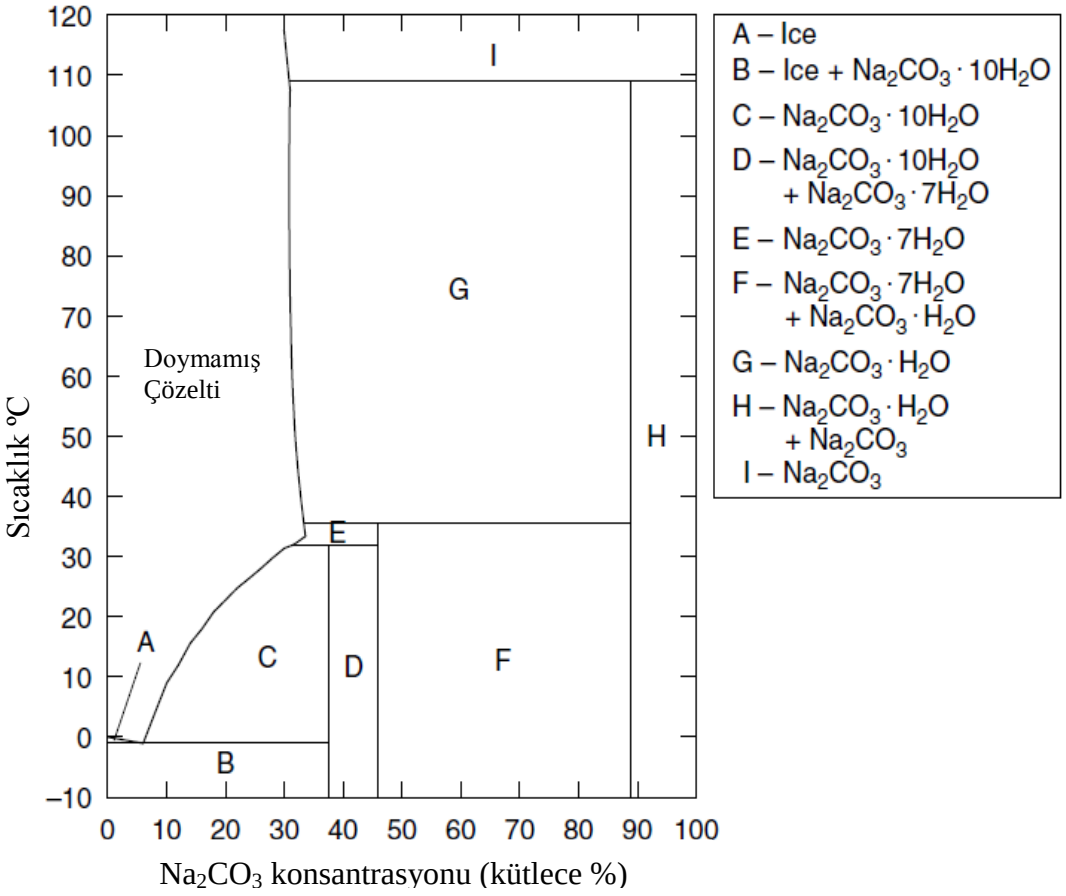
1.3.2.1 Sodyum karbonatın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Sodyum karbonat katı halde, beyaz renkli ve toz formdadır. Suda çözünebilirler. Oda sıcaklığında 215gr/l çözelti elde edilebilirken, 100 ˚C'de 455gr/l çözelti elde edilebilir. Suda çözünmemiş katı halde sodyum karbonatın özkütlesi, 2,54 gr/cm^3'tür.

Erime sıcaklığı 851ºC, kaynama sıcaklığı 1633ºC'dir. Molar kütlesi 105,9885 gr/mol'dür.

Çözeltilerinde üç farklı hidrat formu vardır. Sodyum karbonat monohidrat ($Na_2CO_3.H_2O$), sodyum karbonat heptahidrat ($Na_2CO_3.7H_2O$) ve sodyum karbonat dekahidrat ($Na_2CO_3.10H_2O$). Çözeltinin hangi formda olacağı büyük ölçüde konsantrasyona bağlı olsa da, diğer etken faktör de sıcaklıktır.

Sodyum karbonatın saf suda ki çözünebilirliği Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Sıcaklık artışı 35,4ºC'a kadar çözünebilirliği artırmaktadır. Bu değerden sonra bir miktar azalma izlenir. 35,4ºC'de ki doygun çözeltinin konsantrasyonu %30 ile %33 arasındadır. Sodyum karbonat monohidrat ($Na_2CO_3.H_2O$)'ın %84,48'i Na_2CO_3, %14,52'si kristalize sudur. Sodyum karbonat heptahidrat ($Na_2CO_3.7H_2O$)'ın %45,70'i Na2CO3, %54,30'u kristalize sudur. Sodyum karbonat dekahidrat ($Na_2CO_3.10H_2O$) ise %37,06 Na_2CO_3, %62,94 kristalize su barındırır (Shi ve ark., 2006).



Şekil 1.3 : Sodyum karbonat çözeltisi faz diyagramı.

1.3.2.2 Harç ve beton üretiminde sodyum karbonat kullanımı

Sondyum karbonat beton üretiminde kimyasal katkı olarak kullanılır. Dozajı düşük tutulduğunda hidratasyon hızlandırıcı olarak kullanılır. Dozajı artırılırsa tam tersi priz geciktirici olarak da kullanılabilir (Odler ve ark. 1976). Sodyum karbonatın çimento esaslı malzemelerde iyi bir aktivatör olduğu kanıtlanmış olduğundan, aktivatör olarak kullanımı da yaygındır (Shi ve ark., 2006).

1.3.3 Sodyum silikat

Sodyum silikat su camı ve ya cam suyu (çözünür cam) olarak da bilinir. Moleküler formulasyonu Na_2SiO_3'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 mevcutturlar. Çözeltileri kuvvetli alkalilerdir. Sodyum silikatlar endüstride; temizlik malzemelerinin üretiminde, tekstil sanayinde, kağıt üretiminde, seramik sanayinde, mürekkep üretiminde, otomotiv sektöründe vb. alanlarda kullanılır.

1.3.3.1 Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Sodyum silikat sıvı halde, renksiz ve saydamdır. Katı halde ise opak kristalize açık yeşildir. Suda çözündüğünde şurupsu bir sıvı oluşturur. Suda çözünürlüğü diğer alkalilere oranla düşüktür ve alkol içinde çözünmez.

Sodyum silikat, "$Na2O.nSiO_2$" formülüne sahip bileşliklerin genel adıdır. Teorik olarak "n" her değeri alabilir. Sodyum silikat her farklı "n" değeri için farklı özellikler gösterir ve kullanıldığı endüstriyel uygulamalara göre belirlenir. Buna göre likid sodyum silikat "SiO_2 : Na_2O" oranı en 1,60 ile 3,85 arasındadır. Bu oran 2,85'in altında ise alkalin, üstünde ise nötraldir. Sodyum silikatın dört farklı hidrat formu vardır; $Na_2SiO_3.5H_2O$, $Na_2SiO_3.6H_2O$, $Na_2SiO_3.8H_2O$ ve $Na_2SiO_3.9H_2O$. Çizelge 1.3'de hidrat formları ve değişen "n" değerlerine göre sodyum silikat özellikleri gösterilmiştir (Shi ve ark., 2006).

Çizelge 1.3 : Katı ve sıvı fazda sodyum silikatın özellikleri.

Formul	Yoğunluk (g/cm^3)	Erime Noktası (ºC)	Oluşum Isısı (Kcal/g.mol)	Serbest Enerji (Kcal/g.mol)	Entropi S
$Na_2.SiO_2$	2,614	1089	-359,8	-338	29
$Na_2.2SiO_2$	2,5	874	-576,1	-541,2	39,4
$Na_2.nSiO_2$	-	-	-151,8 n	-142,6	18 n
$Na_2.SiO_2.5H_2O$	1,75	72,2	-722	-631,5	77
$Na_2.SiO_2.6H_2O$	1,81	62,9	-792,6	-688,2	87
$Na_2.SiO_2.9H_2O$	1,65	47,9	-1005,1	-803,3	107

1.3.3.2 Harç ve beton üretiminde sodyum silikat kullanımı

Sodyum silikatın en genel kullanımı beton üretiminde priz hızlandırıcı olarak kullanılmasıdır. Özellikle püskürtme betonlarda priz hızlandırıcı olarak kullanımı yaygındır. Ayrıca çimento esaslı malzemelerde etkin bir alkalin aktivatör olduğu bilinir. Hidrate silikat tozları üretiminde ki teknolojik gelişmelerle beraber, yapı sektöründe çözünür cam uygulamalarında da artış gözlenmektedir. Kuru yapıştırıcılar, tutkal üretimi, petrol kuyusu betonlarının üretimi, koruyucu beton üretmi (radyoaktif, zehirli ve asidik atıklar için) bu sektörel genişlemelere iyi örneklerdir.

2. YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ÜZERİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

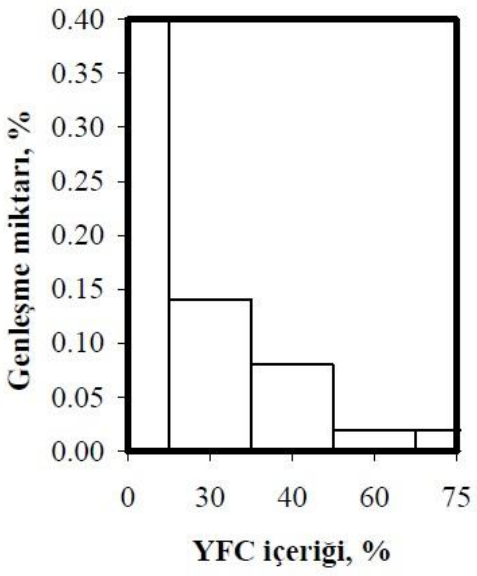
Çeşitli kitaplar, raporlar, makaleler ve bildiriler incelenerek, yüksek fırın cüruflarının beton teknolojisinde kullanılmasının, betonun dayanım ve dayanıklılık özeliklerine olumlu ve olumsuz etkileri anlatılmıstır. Ayrıca alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cüruflarının baglayıcılıgı, beton ve harcın islenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özeliklerine etkilerine yönelik yapılan çalısmalar irdelenmistir.

2.1 Yüksek Fırın Cüruflu Betonlar ve Harçlar Üzerinde Yapılmış Çalışmalar

YFC'nin çimento yerine belirli oranlarda kullanılması durumunda erken yaşlarda beton dayanımları düşmektedir. Ancak 28. günden sonra dayanım kazanma hızı artmakta ve Portland çimentosu ile üretilen betonlardan daha yüksek basınç dayanımları elde edilebilmektedir. YFC ile üretilen betonların eğilme dayanımları ise yine geç yaşlarda hızla artmakta Portland çimentoları ile üretilenlere göre eşit veya daha büyük eğilme dayanımları elde edilebilmektedir. Erken yaşlarda dayanımları yükseltmek için yerine kullanılan çimento miktarını sabit tutarken YFC miktarını arttırmak, öğüterek daha fazla inceltmek veya ağırlıkça %0,5 miktarında trietanolamin kullanılması önerilebilir. YFC'nin betonda kullanılması durumunda taze betondaki işlenebilme artmaktadır. YFC ince öğütülerek betona katıldığı için betondaki ince madde miktarını arttırmakta ve iri tanelerin hareketini kolaylaştırmaktadır. YFC çimentoya göre daha geç ve yavaş reaksiyonlara girdiği için betonun priz süresinin artmasına neden olmaktadır. Sıcak havada beton dökümü sırasında daha avantajlı olmasına karşın soğuk havalarda YFC ile üretilen betonlarda priz hızlandırıcı kullanılması gerekmektedir. YFC çimento yerine kullanılması ile betonda kullanılan çimento miktarı azalmakta ve bu durum betonun hidratasyon ısısının azalmasına neden olmaktadır. Özellikle betonda termik rötre oluşmaması için hidratasyon ısısı düşük bağlayıcı kullanılması gerekmektedir. Çimentonun az kullanılması ile çimentonun folükülleşmesi azalmakta ve YFC'nin çok ince öğütülmesi ile çimento taneleri arasının doldurulması betondaki terleme olayını

azaltmaktadır. Dolayısı ile betonda segregasyon ve rötre azalmaktadır (Erdoğan, 1997, 2003; Tokyay ve Erdoğan, 2003).

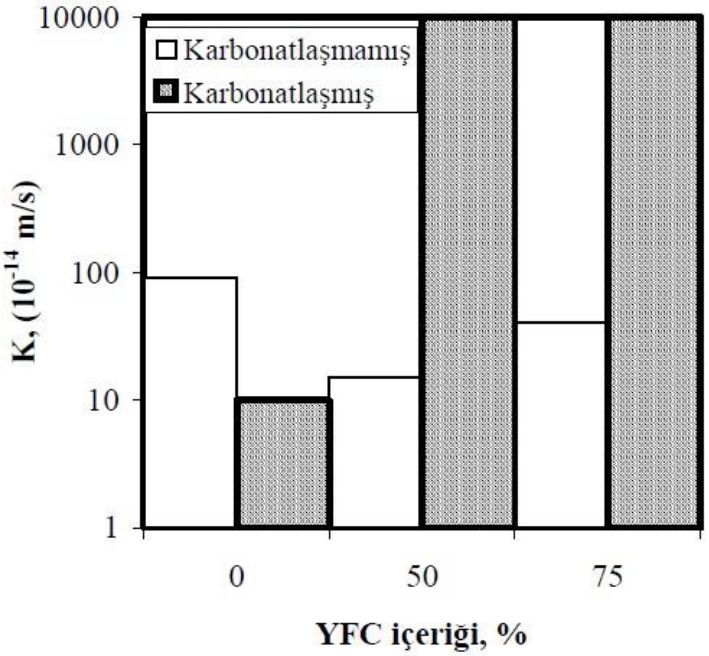
YFC kullanımı betonun dayanıklılığını olumlu yönde etkilemektedir. Özellikle ince öğütüldükten sonra betonda kullanılması durumunda betonun porozitesi azalmakta, rötreyi azalttığı için oluşabilecek mikro çatlaklar azalmakta, bu da betonun geçirimliliğini azaltmaktadır. Betonda geçirimliliğin azalması beton dayanıklılığının arttırılmasında en önemli faktörlerden biridir. Alkali oksit içeren çimento ile aktif silis içeren agregaların yaptığı alkali silika reaksiyonu (ASR) ile oluşan jel betonda genleşme gösterir ve betonun çatlamasına yol açar. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi YFC ile ASR'den dolayı oluşan bu genleşme miktarı azalmaktadır (Arslan, 2001).



Şekil 2.1 : ASR-YFC ilişkisi.

YFC kullanımı ile klor geçirimliliği azalmaktadır. YFC miktarı arttıkça bu azalma belirginleşmektedir. YFC ile üretilen betonların geçirimlilik katsayıları daha yüksektir. Karbonatlaşma reaksiyonundan sonra yapılan incelemelerde YFC ile üretilen betonların geçirimlilik katsayıları daha düşük olarak bulunmuştur. Şekil 2.2'de geçirimlilik katsayısı ile YFC arasındaki ilişki gösterilmiştir. YFC'li betonlarda karbonatlaşmadan sonra geçirimlilik oldukça artmaktadır. Karbonatlaşmanın çok ilerlemesi durumunda donatı korozyonuna yol açmaktadır. YFC kullanılan betonlarda donma-çözülme etkisine karşı kullanılan hava sürükleyici katkı miktarını arttırmak gerekmektedir. YFC'nin betonda kum yerine kullanılması durumunda 1000ºC civarında sıcaklık etkisinde betonda oluşabilecek hasar daha az

olmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisindeki dayanım kaybını da azaltmaktadır. Sülfat beton içerisinde reaksiyonlar yaparak betonun zamanla bozulmasına yol açar. Sülfat zeminden gelebileceği gibi, deniz suyundan, çimento üretimi sırasında fazla katılan alçı taşından gelebilir. Sülfatlar CH ve C_3A ile yaptıkları reaksiyon sonucunda kalsiyum sülfo alüminatları oluşturur. Bu reaksiyonlar sonucunda hacim %227 artar. Beton patlayarak parçalanır. Özellikle deniz suyundaki magnezyum sülfat CSH yapısını da çözmektedir. Sülfata dayanıklılığı arttırmada YFC etkilidir. YFC katkılı çimentolarda C_3A miktarı az olduğu için sülfata dayanıklılığı oldukça fazladır. Sülfata dayanıklı çimentoda YFC miktarı %65'tir (Tokyay ve Erdoğdu, 2003; Baradan ve ark., 2002; Kocataşkın, 1987).



Şekil 2.2 : Geçirimlilik katsayısı - YFC ilişkisi.

Sülfat etkisi altında bırakılmış farklı YFC karışımlarının mikroyapısal değişiminin incelendiği bir çalışmada, sülfat etkisi için magnezyum ve sodyum sülfat çözeltileri hazırlanmıştır. Sodyum sülfat kullanılması durumunda etrenjit oluşumları ve

CSH'lı yapıların bozulduğu görülmüştür. Etrenjit oluşumunda serbest Al_2O_3 miktarı, sülfat etkisine dirençte ana etkenlerden biridir. Sodyum sülfat ile sağlanan sülfat etkisine karşı dirençte %92 oranında YFC kullanılması serbest Al_2O_3 miktarını düşürmesi ile etkilidir. Magnezyum sülfat ile sülfat etkisi sağlandığında benzer reaksiyonlar oluştuğu, farklı olarak CSH jellerinin bozularak zayıf yapıda magnezyum silikat hidrat oluşumu görülmüştür. % 92 oranında YFC kullanılması

sodyum sülfat çözeltisinde olumlu yönde etki yaparken, magnezyum sülfat çözeltisinde olumsuz yönde etki yaptığı görülmüştür. Erken safhada oluşan reaksiyon monosülfat şeklindedir (Gollop ve Taylor, 1996; Canbaz, 2007).

Yüksek oranda YFC içeren betonlara buz çözücü tuzların etkisinin incelendiği bir çalışmada karbonatlaşmanın önemli olduğu vurgulanmıştır. Buz çözücü tuzlara karşı dirençte yüksek oranda YFC, öğütülmüş kimyasal ekler ve sodyum-monoflorürfosfat kullanımının etkili olduğu belirtilmiştir. Buz çözücü tuzların betona etkisinin mekanizmasına yönelik çalışmalar açıklanmış ve çalışmanın sonunda bu mekanizmaya yönelik yeni model geliştirilmiştir. YFC'li çimento karbonatlaşması boşluk miktarını arttırdığı, boşlukların büyüdüğü, hidratasyon reaksiyon ürünlerinin oluşturduğu bağları çözdüğü, karbonatlaşma rötresine neden olduğu vurgulanmıştır. Buz çözücü tuzların etkisine kür koşullarının ve kür suyunun kimyasal bileşiminin de etkisi olduğu da belirtilmiştir. Kür suyu olarak kirece doygun su kullanımı buz çözücü tuzların etkisini azaltmada etkili olduğu görülmüştür. Yine buz çözücü tuzların etkisini azaltmada betonda oluşacak çatlak yapısının ve agrega bağlayıcı arayüzeyinin en önemli faktör olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca buz çözücü tuzların etkisinin belirlenmesinde beton yüzeyinde oluşan buz kalınlığı da etkilidir (Çopuroğlu, 2006).

2.2 Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cüruflu Betonlar ve Harçlar Üzerinde Yapılmış Çalışmalar

Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonlar, bağlayıcı madde olarak Portland çimentosunun yerine alkalilerle aktive edilmiş %100 öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının beton içerisinde kullanılması suretiyle elde edilmektedir (Collins ve Sanjayan, 2001; Canbaz, 2007).

Roy ve Idorn (1982), Portland çimentolu betonlarla kıyaslandığında, alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonların, düşük hidratasyon ısısına, yüksek erken mukavemete ve agresif çevre koşullarında daha üstün durabiliteye sahip olduğunu bildirmiştir (Canbaz, 2007).

Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu kullanıldığında, beton dayanımı ve işlenebilirliği kullanılan alkali kombinasyonuna bağlı olarak değişim göstermektedir (Wang ve ark.,1994).

Alkalilerle aktive edilmiş YFC kullanıldığında beton dayanımları 90 günde 60 MPa'a kadar ulaşabilmekte, çökme kaybı ise normal Portland çimentosundan daha fazla olmaktadır. Elastisite modülü azalmakta, eğilme dayanımı ise 7 MPa değerine kadar ulaşabilmektedir. 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. Normal Portland çimentosu kullanılan betonlar daha çok nem kaybetmektedirler. Alkalilerle aktive edilmiş YFC'li betonlarda gözenek fazla olmasına karşın boyutları küçüktür (Collins ve Sanjayan, 1999, 2000; Wang ve ark., 1994; Karizan ve Zivanovic, 2002; Bakharev ve ark., 1999). YFC sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3), sodyum silikat (Na_2SiO_3) gibi alkalilerle aktive edilebilmektedir. Alkalilerle aktive edilmiş YFC'nin hidratasyonu, normal Portland çimentosunun hidratasyonu gibi başlama, giriş, hızlanma, yavaşlama, bozulma evrelerine sahipken, alkalilerden gelen silikat iyonları ile cüruftan gelen kalsiyum iyonları ile reaksiyonu sonucunda CSH oluşturması gibi farklı mekanizmalar vardır. Aktivasyon enerjileri yaklaşık 57,6 KJ/mol. kadardır. Alkalilerle aktive edilmiş YFC'li betonlarda sürekli olmayan mikro çatlaklar görülmekte ve bu çatlaklar geçirimlilikte etkili olmaktadır. Alkalilerle aktive edilmiş YFC'li betonların çatlak oluşum mekanizmasının modellenmesi çalışmaları sürmektedir (Zhou ve ark., 1993; Jimenez ve Puertas, 1997; Peter and Jack, 1996; Shi ve Li, 1989; Shi ve Day, 1995; Hakinen,1993; Brough ve Atkinson, 2000; Collins ve Sanjayan, 2000; Canbaz, 2007).

Cüruf aktivasyonunda farklı katyonlar, farklı kabiliyetler sergilemekte olup, Na^+ iyonu, cürufun aktive edilmesinde kullanılacak aynı şartlar altındaki Li^+, Na^+ ve K^+ iyonları arasında en iyisidir. R+ iyonları, erken yaşta değil aynı zamanda sonraki yaşlarda da katı çözelti üretme yoluyla hidratasyon ürünlerinin yapısal gelişimine iştirak etmektedir. Hidratasyon ürünlerinin yapısına dahil olmuş Na^+ iyonları, Li^+, Na^+ ve K^+ iyonları arasında miktarı en çok olandır (Wang ve Pu, 1992; Bilim, 2006).

Aktivatörleri sahip oldukları pH değerlerine göre büyükten küçüğe doğru NaOH, Na_2SiO_3 ve Na_2CO_3 şeklinde sıralayan Wang ve Pu (1992), pH değerinin ne kadar büyük olursa, cürufun çözülmesi ve başlangıç safhasındaki hidratasyon ürünlerinin gelişiminin de o kadar yüksek olacağını bildirmiş ve aktivatörlerin pH değerinin, alkalilerle aktifleştirilmiş cüruflu betonların mukavemetinden ziyade priz sürelerini

belirlediğini rapor etmiştir. Araştırmacılar, alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonların mukavemetindeki farklılıkların, alkali bileşiklerin anyon tiplerindeki farklılıktan ileri geldiğini söylemişlerdir (Bilim, 2006).

Aktivatör çözeltisinin başlangıç pH'ı, cürufun çözülmesinde ve bazı hidratasyon ürünlerinin erken gelişiminde önemli bir role sahiptir. Ancak, alkali-cüruflu çimentoların sonraki hidratasyonu ve mukavemet gelişimleri, aktivatör çözeltisinin başlangıç pH'ından çok, aktivatörlerin anyon ya da anyon grupları ile cüruf taneciklerinin yüzeyinden çözülen Ca+2 arasındaki reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan kalsiyumlu bileşikler tarafından kontrol edilmektedir. Bir başka deyişle, alkalilerle aktive edilmiş cürufların hidratasyon karakteristikleri, aktivatör çözeltisinin başlangıç pH'ından ziyade aktivatörlerin anyon ya da anyon gruplarına daha çok bağlı olmaktadır (Shi ve Day, 1995; Bilim 2006).

Cüruf, hidrolik aktivitesini pH değeri 12'den daha büyük olan alkali çözeltilerin aktivasyonu altında göstermektedir. Çözeltinin pH değerinin 12'den büyük olması durumunda, alkali aktivatör, cürufu çözmekte ve ardından kararlı hidratasyon ürünlerinin gelişimi meydana gelmektedir (Yuan ve ark., 1987: Wang ve

Pu, 1992; Bilim, 2006).

Normal kür şartlarında ve uygun işlenebilirlikte, Portland çimentosuna eşit bir günlük mukavemet elde edebilmek amacıyla değişen dozajlarda NaOH ve Na_2CO_3 ile aktive edilen cüruflar üzerinde çalışma yapan Collins ve Sanjayan (1998), NaOH ile aktivasyonun Portland çimentosuna göre daha düşük bir günlük erken dayanım verdiğini ancak NaOH'in, Na_2CO_3 ile birlikte kullanımıyla Portland çimentosu hamuruna eşit bir günlük dayanımın elde edildiğini bildirmişlerdir.

Sodyum silikat ile aktive edilmiş cüruflu harçlarda ara yüzey özellikleri düşük poroziteli agrega ara yüzeyinin meydana gelmesinden dolayı çok iyidir. Harçlarda sodyum silikat ile aktivasyon sonucu oluşan hidratasyon ürünleri, amorf ve uniform yapıdadır. Cam suyu yerine KOH (alkali oksit) ile yapılan cüruf aktivasyonunda meydana gelen hidratasyon ürünleri ise çok daha heterojen yapılı olup, daha düşük mukavemet gelişimine ve daha boşluklu bağlayıcı madde hamuru ile agrega ara yüzeyine neden olmaktadır (Brough ve Atkinson, 2002; Bilim 2006).

Değişik modül ve konsantrasyonlarda farklı aktivatörler kullanmak suretiyle, öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının alkalilerle aktive edilmesi üzerine

yapılan bir araştırmada, cüruflu sistemlerin aktivasyonunda kullanılan sodyum silikatların, aynı su/bağlayıcı oranındaki Portland çimentolu harçların mukavemetlerini de aşacak şekilde en iyi aktivasyonu sağladığı bildirilmiştir. Öte yandan, yüksek silika modüllerinde erken mukavemet azalırken, priz süresi de önemli bir şekilde kısalmakta ve yüksek orandaki alkali konsantrasyonlarında, sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen cüruf katkılı betonlar yüksek rötre değerleri göstermektedir (Bakharev ve ark., 1999).

Krizan ve Zivanovic (2002), uygun dozajda ve 0.6 ile 1.5 arasında bir n modülüne sahip cam suyu ile aktive edilmiş cüruflu çimentoların Portland çimentolarına göre daha yüksek son mukavemet gösterdiğini bildirmiştir (Bilim, 2006).

Jimenez ve ark. (1999), cürufların aktivasyonunda kullanılan alkali aktivatör yapısının çok önemli olduğunu bildirerek, elde ettikleri mukavemet değerlerine göre kullanılan aktivatörleri Na_2SiO_3+NaOH>>Na_2CO_3>NaOH şeklinde sıralamışlardır.

Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufları kullanıldığında beton dayanımları 90 günde 60 MPa'a kadar ulaşabilmekte, çökme kaybı ise normal Portland çimentosundan daha fazla olmaktadır. Elastisite modülü azalmakta, eğilme dayanımı ise 7 MPa değerine kadar ulaşabilmektedir. Sünme ise artmaktadır (Collins ve Sanjayan, 1999).

Collins ve Sanjayan (1999), alkali aktive edilmiş cüruflu betonların Portland çimentolu betonlara göre karışım zamanında oldukça iyi bir işlenebilirlik ve daha az slump kaybı gösterdiğini ve bir günden sonraki yaşlarda elde edilen mukavemet değerlerinin de Portland çimentolu betonlara göre daha üstün olduğunu bildirmişlerdir.

Alkali aktive edilmiş cüruflu çimento ve beton üzerine araştırma yapan Wang ve ark. (1995)'na göre, sodyum silikat (cam suyu) ile aktivasyon çok hızlı sertleşme ve yüksek basınç mukavemeti vermektedir.

Sodyum silikat ile aktive edilmiş cüruf içeren harçlarda sodyum klorür veya elma asidinin geciktirici etkisi üzerine araştırma yapan Brough ve ark. (2000), cüruf ağırlığının %8'i oranında NaCl ilavesinin bu sistemlerin hem mukavemet gelişimini hem de prizini önemli bir şekilde geciktirdiğini ve bu geciktirici etkinin %0,5 oranındaki malik asit ya da bir başka deyişle elma asidi ilavesiyle ortaya çıkan etkiye göre çok daha az olduğunu bildirmişlerdir. %4 ya da daha az oranlardaki NaCl

ilavesi ise alkali aktive edilmiş cüruflar üzerinde geciktirmenin aksine hızlandırıcı bir rol oynamaktadır.

Collins ve Sanjayan (2001), ıslak kür eksikliğinin alkali aktive edilmiş cüruflu betonlarda ölçülen mikro çatlak seviyesini arttırdığını ve aynı zamanda, alkali aktive edilmiş cüruflu betonlardaki mukavemet gelişiminin yetersiz kür şartları nedeniyle önemli ölçüde azaldığını, yapılarda kullanılması durumunda bu betonların çok iyi kür edilmesinin zorunlu olduğunu bildirmiştir.

Değişik kür koşullarına maruz bırakılmış numunelerin mukavemetlerinde önemli farklılıklar olduğunu bildiren Collins ve Sanjayan (1999), alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonların kür eksikliğine karşı daha büyük hassasiyet gösterdiğini bildirmiştir (Bilim, 2006).

Kutti ve ark. (1992), NaOH ile aktive edilmiş cüruflu harçlardan, 20ºC ve %33 bağıl nem altında kür edilenlerin, 20ºC ve %94 bağıl nemde kür edilen numunelere göre %35 daha düşük basınç dayanımı gösterdiğini, %76 ve %86 bağıl neme bırakılan numunelerin ise %94 bağıl nemde kür edilenlere benzer basınç mukavemetleri sergilediğini bildirmişlerdir.

Bakharev ve ark. (1999), sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak hazırlanan alkali aktiviteli cüruflu betonlar üzerinde uyguladıkları sıcak kürün, erken yaşlardaki mukavemet gelişimini hızlandırdığını ancak oda sıcaklığında kür edilen numunelere göre son dönemdeki basınç mukavemetlerinde bir düşme görüldüğünü, bu düşüşün alkalilerle aktive edilmiş betonların mikro yapılarındaki heterojen dağılımın bir sonucu olarak ortaya çıkan iri boşluk yapısından ileri geldiğini bildirmişlerdir.

Cüruf, Portland çimentosuyla kısmi yer değiştirilmek suretiyle ilave bağlayıcı madde olarak beton içerisinde sıkça kullanılmaktadır. Portland çimentosunun cüruf ile yer değiştirilerek kullanılmasının %100 Portland çimentolu bağlayıcı ile kıyaslandığında en büyük avantajı, üstün durabilite ve düşük hidratasyon ısısıdır. Ancak, bu betonların erken yaştaki düşük mukavemeti birçok uygulama için sınırlayıcı olmaktadır. İlk zamanlarda görülen bu düşük mukavemet probleminin daha yüksek erken mukavemet kazanmaya yardımcı olabilecek alkalilerle aktive edilmiş cüruf kullanmak suretiyle üstesinden gelinebilmektedir (Collins ve Sanjayan, 1999; Bilim 2006).

Palacios ve Puertas (2005), NaOH ile aktive edilmiş cüruflu harçların eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerlerinin hem Portland çimentolu hem de camsuyu ile aktive edilmiş cüruflu harçlarınkinden çok daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. %4 Na_2O içeriğine sahip cam suyu ile aktive edilmiş cüruflu harçların mukavemetleri, tüm kür yaşlarında Portland çimentolu harçlardan elde edilen değerlerden düşük olmuştur. Öte yandan, %5 Na_2O içeriğine sahip cam suyu ile aktive edilmiş cüruflu harçların mukavemetleri ise, 2 günlük kürün ardından, Portland çimentosu içeren harçlarınkinden düşük olmasına rağmen, %4 Na_2O içeriğine sahip cam suyu ile aktive edilmiş cüruflu harçların mukavemetlerinden daha yüksek çıkmış, 7 ve 28 günden sonra ise diğer tüm harçların mukavemetlerinden daha yüksek değerler vermiştir.

Bakharev ve ark., (1999), basınç mukavemeti ve işlenebilirlik çalışmalarına dayanarak, alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonlarda kullanım için Ms=0,75 ve %4 Na konsantrasyonlu sodyum silikat çözeltisini önermişlerdir.

Shi ve Day (1999), doğru alkali aktivatör seçildiği takdirde, alkalilerle aktive edilmiş cüruflu sistemlerin erken ve son dönemdeki mukavemetlerinin, ilk dayanımı yüksek (ASTM Tip III) Portland çimentolu sistemlerinkinden daha yüksek olduğunu bildirmiştir (Bilim, 2006).

Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu hamurların başlangıç ve bitiş priz zamanları portand çimentolu hamurlarınkinden çok daha kısadır (Collins ve Sanjayan, 1998; Bakharev ve ark., 1999; Palacios ve Puertas, 2005; Bilim, 2006).

Alkali aktive edilmiş cüruflu çimentoların priz zamanı üzerine bir çalışma yapan Jimenez ve Puertas (2001), alkali aktive edilmiş cüruf içeren çimento hamurlarının priz zamanının, kullanılan aktivatörün çeşidini de bağlı olarak gelişen reaksiyon ürünlerinin yapısı tarafından şekillendirildiğini bildirmiştir. Aktivatör olarak cam suyu kullanıldığında, cüruftan gelen Ca^{+2} iyonları, hızlı bir şekilde çözeltinin silikat iyonları ile reaksiyona girerek hamurun donmasını sağlayan başlangıç kalsiyum silika hidratenin çökelmesine yol açar. Sonraki yaşlarda ana ürün olarak yüksek polimerizasyon derecesine sahip kalsiyum silika hidrate oluşur. Aktivatör NaOH olduğunda, cürufun hızlı erimesi meydana gelir, ana ürün olarak, hamurun donmasından sorumlu kalsiyum silika hidrateyi oluşturur. Aktivatör Na_2CO_3 olduğunda ise, cürufun Ca^{+2} iyonları, aktivatörün CO_3^{-2} iyonları ile reaksiyona girer

ve indüksiyon zamanının artmasından ve kuruma olmaksızın plastiklik kaybından sorumlu olan başlangıç kalsiyum ya da sodyum kalsiyum karbonatı oluşturur. Daha sonra, uzun zamanlarda (bazen üç günden daha fazla) hamurun donmasına neden olan kalsiyum silika hidrate meydana gelir.

Alkali-cüruflu çimentoların erken dönemdeki hidratasyonu üzerinde cam suyu modülünün ve dozajının etkileri ile ilgili bir çalışma yapan Krizan ve Zivanovic (2002)'e göre, cam suyu ile aktive edilmiş cüruflarda, cam suyu dozajı gibi n modülünün artması, Portland çimentosununkinden daha düşük olmasına rağmen, kümülatif hidratasyon ısısını arttırmaktadır.

Sodyum silikat ile alkali aktive edilmiş cüruflu sistemlerin kalorimetrilerinde cürufun ıslanmasından dolayı başlangıçta meydana gelen ısı yayılımının ardından, iki pik gözlenir. Birinci pik, sodyum silikatın kuruması ve donmasına, ikinci pik de mukavemet gelişiminden sorumlu cüruf hacminin hidratasyonuna karşılık gelir (Brough ve Atkinson, 2002; Bilim, 2006).

Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cüruflarının hidratasyonu, normal Portland çimentosunun hidratasyonu gibi başlama, giriş, hızlanma ve yavaşlama gibi evrelere sahipken, alkalilerden gelen silikat iyonları ile cüruftan gelen kalsiyum iyonlarının reaksiyonu sonucunda C-S-H oluşması gibi farklı mekanizmalar vardır. Aktivasyon enerjileri yaklaşık olarak 57.6 KJ/mol. kadardır (Zhou ve ark., 1993).

Collins ve Sanjayan (1999), doygun durumdaki havada soğutulmuş yüksek fırın cüruflu iri agreganın, normal ağırlıklı iri agrega ile yer değiştirilmesiyle elde ettikleri alkali ile aktive edilmiş cüruflu betonlar üzerinde yaptıkları çalışmalarında, agregadan gelen nemin yavaşça ortaya çıkması sonucu betonun içyapısında meydana gelen kürün, basınç mukavemetini arttırdığı ve kuruma rötresini de önemli bir şekilde azalttığını bildirmiştir (Bilim, 2006).

0,5 su/bağlayıcı oranında, sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiş cüruf katkılı betonlar, Na_2CO_3 ile NaOH in birlikte kullanılmasıyla aktive edilen cüruf katkılı betonlar gibi, daha az işlenebilirlik ve önemli çökme kayıpları gösterirken, toz formundaki sodyum silikat ile aktive edilmiş cüruf içeren betonlarda ise daha az çökme kaybı gözlenmiştir. Öte yandan, kuru formdaki sodyum silikat ile aktive edilmiş cüruflu betonlar ve Na_2CO_3+NaOH kombinasyonuyla aktive edilen cüruf katkılı betonlar,

normal Portland çimentolu betonlara göre oldukça yüksek rötre değerleri göstermiştir (Collins ve Sanjayan, 1999).

Krizan ve Zivanovic (2002)'e göre, alkaliyle aktive edilmiş cüruflu çimentoların kuruma rötreleri, Portland çimentosununkinden oldukça fazla olup cam suyu ile aktive edilmiş cüruflu çimentolarda, cam suyu dozajının artmasıyla ya da yükselen n modülüyle daha yüksek değerler almaktadır (Bilim, 2006).

Bakharev ve ark. (1999), sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak hazırladıkları alkali aktiviteli cüruflu betonlara uygulanan sıcak kürün, normal Portland çimentolu betonlarınkiyle kıyaslanabilecek seviyede kuruma rötresini azaltmada çok etkili olduğunu ve yüksek sıcaklıktaki bu kürden evvel oda sıcaklığında uygulanacak öncelikli bir kür işleminin, rötreyi oldukça azalttığını rapor etmişlerdir.

Kutti ve ark. (2002), %59 bağıl neme maruz bırakılmış, NaOH ve Na_2CO_3 gibi alkalilerle aktive edilen cüruf katkılı betonların 12 aylık rötre değerlerinin normal Portland çimentolu betonlara göre 1,83 kat daha fazla olduğunu bildirmişlerdir.

Alkalilerle aktive edilmiş cüruf içeren betonların normal Portland çimentolu betonlara göre daha yüksek kuruma rötresi değerleri sergilediğini bildiren Collins ve Sanjayan (2000), bunun muhtemel nedeninin alkalilerle aktifleştirilmiş cüruflu betonlardaki orta ölçekli boşlukların normal Portland çimentolu betonlara göre daha fazla olmasından ileri geldiğini belirtmiştir. Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonların kuruma esnasındaki nem ve ağırlık kayıpları, normal Portland çimentolu betonlara göre daha az olmasına rağmen, rötre birim şekil değiştirmelerinin büyüklüğü daha fazladır ve kuruma esnasında ortaya çıkan kapiler çekme kuvvetleri alkalilerle aktive edilen cüruflu betonların rötresi için çok önemli bir faktör olmaktadır (Bilim, 2006).

Roy ve ark. (2000)'na göre, alkali aktivite edilmiş bağlayıcı malzemelerin, yüksek erken ve son dayanım, hızlı mukavemet gelişimi, düşük permeabilite, çelik donatı için düşük korozyon hızı, kimyasal saldırılardan ya da yüksek klorür difüzyonundan ileri gelen etkilere dayanıklılık, daha az hidratasyon ısısı, düşük maliyetli beton üretimi, enerji tasarrufu ve daha temiz bir çevre gibi önemli avantajları vardır.

Bakharev ve ark. (2002), alkalilerle aktive edilmiş cüruf içeren betonların sülfat dayanıklılığını tayin etmek amacıyla yaptıkları çalışmada, %5 sodyum sülfat ve %5

magnezyum sülfat çözeltilerine daldırılan cüruflu ve salt Portland çimentolu numunelerin bir yıl sonundaki mikro yapısal değişikliklerini ve basınç mukavemeti gelişimlerini incelemişlerdir. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler üzerinde yapılan testler, numunelerde meydana gelen mukavemet kayıplarının, alkalilerle aktifleştirilmiş cüruf içeren betonlar için %17, normal Portland çimentolu betonlar için ise %25 olduğunu ortaya koymuştur. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde meydana gelen mukavemet kaybı ise daha büyük olup, alkalilerle aktive edilmiş cüruf katkılı betonlarda %23, normal Portland çimentolu betonlarda ise %37'dir. Sülfat atağı neticesinde meydana gelen bozulmanın ana ürünleri, Portland çimentolu sistemlerde etrenjit ve alçı olurken, alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonlarda bu yalnızca alçı olmaktadır.

Bakharev ve ark. (2001), alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonların karbonatlaşmaya karşı dayanıklılıklarını belirlemek için iki test yöntemi kullanmak suretiyle yaptıkları çalışmalarında, alkalilerle aktive edilmiş cüruf katkılı betonların karbonatlaşma dirençlerinin normal Portland çimentolu betonlara göre daha düşük olduğunu, normal Portland çimentolu betonlara kıyasla daha yüksek mukavemet kaybı ve karbonatlaşma derinliği gösterdiklerini rapor etmişlerdir (Bilim, 2006).

Alkalilerle aktive edilmiş cüruf içeren betonlar normal Portland çimentolu betonlara göre daha yüksek karbonatlaşma değerleri göstermektedir (Pu ve ark., 1988: Bakharev ve ark., 2001).

Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonlar, Portland çimentolu betonlara göre aktivasyonda kullanılan önemli miktardaki alkali içeriğinden dolayı alkali agrega reaksiyonundan meydana gelen genleşme ve çatlamalara karşı daha duyarlıdırlar. Betonların alkali agrega reaksiyonları neticesindeki bozulma mekanizması, reaktif agregaların yakınında meydana gelen alkali silika jellerinin gelişimi, genleşmesi ve nihayetinde betonun çatlaması ile kendini göstermektedir. Cüruflu betonlarda ortaya çıkan bu genleşmeler, hızlı mukavemet gelişimi ile bir miktar azaltılabilmektedir

(Bakharev ve ark., 2001).

Bakharev ve ark. (2003), alkalilerle aktive edilmiş cüruf katkılı betonların asit ortamına karşı Portland çimentolarına göre daha üstün durabiliteye sahip olduğunu, asit atağı neticesinde meydana gelen bozulma mekanizmasının da C-S-H jellerinin

ayrışması ve çözülebilir kalsiyum asetat tuzlarının gelişimi şeklinde ortaya çıktığını bildirmiştir.

Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonların, Portland çimentolu betonlarla kıyaslandığında birçok üstün özellikleri olmasına karşın, gösterdikleri zayıf işlenebilirlik ve yüksek rötre gibi bazı özellikleri, pratik olarak uygulanmalarına engel olmaktadır. Bu amaçla normal Portland çimentoları için kullanılan kimyasal katkıların, alkalilerle aktive edilmiş cüruf katkılı betonlar üzerindeki etkilerini araştıran Bakharev ve ark. (2000), cüruf ağırlığının %6'sı kadar katılan alçı gibi, hava sürükleyici ve rötre azaltıcı katkıların da alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonların rötresini azaltmada etkili olduğunu ve öte yandan işlenebilirliği de iyileştirmesinden dolayı hava sürükleyici katkının bu betonlar için en uygunu olduğunu bildirmişlerdir (Bilim, 2006).

Avustralya'da yapılan bir çalışmada YFC'ler, aktivatör olarak sodyum silikat, sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum fosfat ve kombinasyonları kullanılarak aktive edilmiştir. Dayanımlar 20-40 MPa arasında bulunurken, aktivasyonda sıvı sodyum silikatın daha etkili olduğu belirtilmiştir. Dayanım, oluşturulan karışımın modülüne (SiO_2-Na_2O oranı 0,75-1,5) ve alkali konsantrasyonuna bağlı olduğu görülmüştür. Yüksek modüllerde erken dayanım azalırken, priz süresi belirgin bir şekilde kısalmıştır. Yüksek konsantrasyonlu sodyum silikat karışımları kullanılarak aktive edilen YFC'lerin yüksek oranda rötre oluşturmuş ve ani priz davranışı gibi davranış göstermiştir. Kür sıcaklığının arttırılması aktive edilmiş YFC'lerin dayanım gelişimine olumlu katkıda bulunduğu görülmüştür. Normal Portland çimentosu-YFC'nin birlikte aktive edilip bağlayıcı olarak kullanıldığı sistemlerin dayanımı, sadece alkalilerle aktive edilmiş YFC'nin bağlayıcı olarak kullanıldığı sistemlerin dayanımlarına göre daha düşük olduğu belirtilmiştir. YFC'lerin aktivasyonu için SiO_2-Na_2O oranı 0,75 ve sodyum içeriği de %4 olarak kullanılması durumunda en iyi sonuçların elde edileceği belirtilmiştir (Bakharev ve ark., 1999; Canbaz, 2007).

Atıkların değerlendirilmesine yönelik yapılan bir çalışmada, aktive edilmiş YFC yerine bir kısım jeotermal silis atığının yer değiştirilmesi ile üretilen harçlar 90 gün kür edilmiş ve aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat kullanılmıştır. Silis atığı, hidratasyon ürünlerinin oluşumlarını arttırmıştır. İçyapı çalışmaları sonucunda katkılı YFC'lerin boşluk miktarını azalttığı, agrega-bağlayıcı ara yüzeylerinin katkılı YFC kullanılması durumunda daha dolu ve homojen bir yapıda olduğu görülmüştür.

Sodyum hidroksit ile aktive edilen YFC yerine bir kısım silis atığı kullanılması durumunda basınç dayanımı artarken, YFC'nin sodyum silikat ile aktive edilmesi ve bir kısım silis atığı ile yer değiştirmesi durumunda karıştırma ve yerleştirme sırasında oluşan boşluklardan, silisin inorganik bağlayıcı oluşturması veya ani prizden dolayı basınç dayanımı düşmüştür. Sodyum hidroksit ile aktive edilen YFC'lerin hidratasyonu sonucunda kalsiyum-silis oranları ve CSH oluşumları azalmıştır (Escalante ve ark., 2003, Canbaz 2006).

Farklı kür ortamlarının, aktive edilmiş YFC'li betonların mikroçatlak ve dayanım gelişimine etkisinin incelendiği bir çalışmada, mikroçatlak gelişimi, yüzey çatlak boyunun ölçülmesi, kapiller su emme ve boşlukların ölçülmesi ile incelenmiştir.

Açık havada bekletilen numunelerde mikroçatlak miktarı artmış, dayanımlar belirgin oranda azalmıştır. Oda sıcaklığında %50 nemli ortamda bekletilen alkali aktive edilmiş YFC'li betonların dayanımları standart su kürü uygulanan betonların dayanımlarına göre %50 civarında azalmıştır. Açık havada kür edilen alkali aktive edilmiş YFC'li betonlarda gözle görülür mikroçatlaklar oluşmuş ve zamanla çatlak genişliklerinin arttığı görülmüştür. Yine açık havada kür ile numunelerde boşluk miktarının arttığı ve boyutunun büyüdüğü görülmüştür. Açık havada kür uygulaması ile alkali aktive edilmiş YFC'li betonlarda oluşan bu boşluk yapısının birbiri ile bağlantılı bir ağ şeklinde devam ettiği kapiler su emmesinin diğer kür yöntemleri uygulanan alkali aktive edilmiş YFC'li betonlarınkine göre azalmasından anlaşılmaktadır (Collins ve Sanjayan, 2001; Canbaz, 2007).

Yapılan bir çalışmada silis dumanı ve YFC'nin sodyum hidroksit, sodyum silikat ile aktive edilmesi durumunda basınç dayanımları ve suya karşı direnç yani hidrolik bağlayıcılığını arttığı görülmüştür. Basınç dayanımları 2-20 MPa arasında değişmiştir. Sodyum silikat kullanılması durumunda sodyum hidroksit ile aktive edilmiş numunelere göre dayanım artmıştır. Mikroyapı incelendiğinde alkalilerle aktive edilmiş numunelerin hidratasyon ürünlerinin daha çok amorf yapıda olduğu görülmüştür. Yine açık havada kür edilmesi durumunda daha büyük boşluklar oluştuğu ve toplam boşluk oranının arttığı belirtilmiştir (Rousekova ve ark., 1997).

YFC, C sınıfı uçucu kül, metakaolin gibi endüstriyel atıkların aktivasyonunun araştırıldığı bir çalışmada, aktivatör olarak çimento üretimi sırasında açığa çıkan tozlar kullanılmıştır. Uçucu küle göre karşılaştırıldığında metakaolin kullanılan

karışımların dayanımları artmıştır. İki farklı çimento üretim sahasından alınan tozların kimyasal yapısı incelendiğinde, birincisinde %14 reaktif fazın ve %19 alkali yapının olduğu, ikincisinde ise %45 reaktif fazın ve %3 alkalilerin olduğu görülmüştür. Alkalilerin fazla olduğu ve YFC kullanılan hamurun 22 MPa'lık basınç dayanımı ile diğer mineral katkılarla üretilen hamurlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Çekme dayanımında ise alkalilerin az olduğu ve YFC kullanılan hamurun 5,2 MPa ile en yüksek değere ulaştığı görülmüştür (Buchwald ve Schulz, 2005; Canbaz, 2007).

Yapılan bir çalışmada soydum silikat ile aktive edilmiş YFC'li betonların kuruma rötresi normal Portland çimentolu betonların kuruma rötresine göre artmıştır. Ayrıca alkali aktive edilmiş YFC'li betonların elastisite modülleri azalırken, sünmesi ve çekme dayanımları artmıştır. Kür yönteminin, agrega çeşitinin, rötre azaltıcı kimyasal katkıların alkali aktive edilmiş YFC'li betonların çatlama davranışını etkilediği görülmüştür. Açık havada bekletilen alkali aktive edilmiş YFC'li betonlarda oluşan çatlak miktarı ve genişlikleri standart su kürü uygulanması durumuna göre artmıştır. Kullanılan rötre azaltıcı kimyasal katkı, alkali aktive edilmiş YFC'li betonlarda rötre çatlağı oluşma süresini değiştirmezken büyüklüğünü azaltmıştır. Çimento yerine %100 oranda YFC kullanılması durumunda en olumlu çatlak eğilimi görülmüştür. Açık havada bekletilen bu numunelerde kılcal çatlaklar 10. günde görülmüştür. Oluşan çatlak miktar ve genişlikleri normal Portland çimentolu betonlara göre daha azdır. Standart 3-7 gün su kürü uygulanan numunelerde çatlak oluşumları görülmemiştir. Alkali aktive edilmiş YFC'li betonların rijitliğinin azalması, çatlak öncesi şekil değiştirme yeteneğinin artmasını açıklamaktadır (Collins ve Sanjayan, 2000; Canbaz, 2007).

Alkali aktive edilmiş YFC'li kütle betonlarının dayanım ve rötresinin incelendiği bir çalışmada 0,8 x 0,8 x 1,2 m boyutlarında numuneler üretilmiştir. YFC, çimento ile %50 ve %100 oranlarında yer değiştirmiştir. Aktivatör olarak toz halinde sodyum silikat kullanılmıştır. %100 oranında alkali aktive edilmiş YFC kullanılması durumunda betonların işlenebilirliğinin arttığı, çökme kaybının azaldığı belirtilmiştir. En yüksek iç sıcaklığa %100 YFC kullanılması durumunda 18 saatte, %50 YFC ve çimento kullanılması durumunda 13,5 saatte ulaşmıştır. Numunelerin en yüksek dış-iç sıcaklık farkı %100 YFC kullanılması durumunda 10,5ºC, %50 YFC kullanılması durumunda 15ºC, çimento kullanılması durumunda 20ºC olduğu belirtilmiştir.

Laboratuar ortamında bekletilen numunelerin dayanımı su kürü uygulanan numunelerin dayanımından daha düşük çıkmıştır. Alkali aktive edilmiş YFC'li numunelerin dayanımı kuruma etkisinin daha az olduğu iç bölgeye ilerledikçe artmaktadır. Bu dayanım farkı %10 civarlarında olduğu belirtilmiştir. Yapılan ölçümlerde iç kısımlarda ve dış kısımlarda genleşmenin farklı olduğu görülmüştür. Normal Portland çimentosu ile üretilen betonlarda çatlak görülürken, alkali aktive edilmiş YFC'li betonlarda çatlak görülmemiştir. Ayrıca alkali aktive edilmiş YFC'li betonların çekme dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür (Collins ve Sanjayan, 1999; Cambaz, 2007).

Farklı akışkanlaştırıcı ve rötre azaltıcı katkıların alkali aktive edilmiş YFC'li hamur ve harçlara etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, mekanik ve reolojik özelikler ile priz süreleri incelenmiştir. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Sodyum hidroksit kullanılarak oluşturulan alkali ortamda kimyasal yapısı değişmeyen naftalin bazlı katkılar kullanıldığında mekanik dayanımları arttırdığı, işlenebilirliği iyileştirdiği, priz başlama ve bitirme sürelerini geciktirdiği görülmüştür. Aktivatör olarak sodyum silikat kullanılması durumunda basınç dayanımları ve çekme dayanımları artarken, sodyum hidroksit kullanılması durumunda azalmıştır. Sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC'lere farklı kimyasal katkılar kullanılması durumunda basınç ve çekme dayanımlarında çok büyük değişim gözlenmemiştir. Sodyum hidroksit kullanılması durumunda farklılıklar oluşmuş ve en iyi çekme ve basınç dayanımını naftalin ve vinil bazlı katkılar vermiştir. Çökme kayıpları ise sodyum hidroksit kullanılması durumunda artarken, en iyi sonucu naftalin bazlı katkılar vermiştir. Sodyum silikat kullanılması durumunda süre artması ile beraber naftalin bazlı katkılar çökme kaybını önleyemediği görülmüştür. Kullanılan katkıya göre priz sürelerinde düzenli bir değişim gözlenmezken, en erken priz başlangıcı 21 dakika ile polikarboksil esaslı katkı kullanılan sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC'li numunelerde, en geç priz bitiş süresi ise 320 dakika ile naftalin esaslı katkı kullanılan sodyum hidroksit ile aktive edilmiş YFC'li numunelerde görülmüştür. Sodyum hidroksit ile aktive edilen YFC kullanılması durumda kullanılan kimyasal katkıların birçoğunda priz başlama ve bitiş süresi arasındaki farkın oldukça az olması nedeni ile katkı kullanılmadan önce priz süreleri belirlenmeli ve önlem alınmalıdır (Palacios ve Puertas, 2005; Canbaz 2007).

Rötre azaltıcı katkıların sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC'li hamur ve harçların özeliklerine etkilerinin incelendiği bir çalışmada, katkının harcın boşluk yapısına mineralojik bileşimine ve miktoyapısına etkisinin olduğu görülmüştür. Rötre azaltıcı katkı kullanılması durumunda laboratuar koşullarında bekletilen alkali aktive edilmiş YFC'li numunelerde %50 oranında kuruma rötresini, su kürü uygulanmış numunelerde %85 oranında otojen rötreyi azalmıştır. Ayrıca rötre azaltıcı katkı kullanılması ile her iki kür koşulunda da alkali aktive edilmiş YFC'li numunelerin boşluk miktarı, boşluk boyutunu düşürmesi ile azalmıştır. Bu boşluklarda, katkı kullanılmayan harçların küçük kapiler boşluklarına göre, kapiler gerilme azalmıştır. Yüksek miktarda rötre azaltıcı katkılar kullanıldığında YFC'nin alkali aktivasyonunu geciktirdiği görülmüştür. Rötre azaltıcı katkının boşluk suyu yüzey gerilmesini azaltıcı yönde ve boşluk yapısını değiştirmesi şeklinde olumlu etkileri vardır. Bu katkının kullanılması ile Al ile Si yer değiştirmesi sonucunda Al oranı azalmış Si oranı artmıştır.

Katkının reaksiyon yeteneği genel olarak kür koşullarına bağlı olduğu görülmüştür. Rötre azaltıcı katkı her iki kürde de bağlayıcı hamurun mineral bileşimini değiştirmemiştir (Palacios ve Puertas, 2007).

YFC ve metakaolinin, potasyum hidroksit-potasyum silikat ile aktive edilerek üretilen numunelerin mikroyapısının belirlenmesine yönelik yapılan bir çalışmada mikroyapı XRD ve SEM kullanılarak belirlenmiştir. XRD çalışmaları sonunda normal Portland çimentosu kullanılarak elde edilen bağlayıcı yapının yarı kristal CSH jellerinden, etrenjit, CH ve kuvarstan oluştuğu, alkali aktive edilmiş YFC ve metakaolinden oluşan bağlayıcı yapının ise genel olarak amorf olduğu görülmüştür. Normal Portland çimentosu SEM çalışmaları sonucunda aktive edilmiş metakaolinden oluşan bağlayıcı yapının homojen olduğu, YFC kullanılması durumunda YFC taneleri bağlayıcı faz tarafından sarıldığı görülmüştür. EDX analizinde özel bir yapının oluşmadığı görülmüştür. Aktive edilmiş metakaolin haricinde diğer tüm numunelerde karbonatlaşma sonucu oluşan boşluklar görülmüştür. Aktive edilmiş YFC'li numunelerde alüminosilikat oluşumları görülmüştür. Buna bağlı olarak Al miktarı artmıştır. Ayrıca mikroyapıda kısmen bozulmuş YFC taneleri görülmüştür. Aktive edilmiş YFC'nin hidratasyon reaksiyonları sonunda oluşan CSH jelleri birbirine uzun zincirler halinde bağlandığı

görülmüştür. Kalsiyum-silisyum oranı YFC kullanılması durumunda azalmıştır (Lecomte ve ark., 2006; Canbaz, 2007).

Alkali aktive edilmiş YFC pastası boşluk yapısında oluşan CSH jellerinin yapısı ve bileşimini incelenen bir çalışmada, Ca, Si, Na, Mg, Al, pH miktarları belirlenmiş ve katı fazlar analiz edilmiştir. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Boşluk yapısında oluşan iyon bileşiminde en önemli değişimler sodyum silikat ile aktive edilmesi durumunda, 3-24 saat arasında, Na ve Si miktarının azalması ile oluşmuştur. Sodyum hidroksit ile aktive edilmesi durumunda boşluk yapısındaki oluşum daha farklı gelişmiş, Na ve Si miktarının azalması daha fazla ilerlemiştir. Alkali aktivatör kullanılması ile CSH yapı ve içeriğinde değişimlere neden olmuştur. Sodyum silikat ile aktive edilmesi durumunda CSH, düşük Ca-Si oranına sahip, seyrek dizilişte bir yapıya sahip olurken, sodyum hidroksit ile aktive edilmesi ile, CSH jelleri Al, Ca-Si oranı yüksek ve daha sık dizilişe sahip olduğu görülmüştür (Puertas ve ark., 2004; Canbaz, 2007).

Alçıtaşı ve fosforik asitin, sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC'li hamurun özeliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, alkali aktive edilmiş YFC'lerin iyi bir bağlayıcı olmasına rağmen, hızlı priz ve kuruma rötresi gibi olumsuz etkileri olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarda fosforik asitin geciktirici, alçıtaşının kuruma rötresi inhibitörü olduğu belirtilmiştir. Bu iki malzemenin bir arada kullanılmasına yönelik yapılan bu çalışmada, sadece alçıtaşı kullanılması ile priz süresi azalmış, basınç dayanımı artmış, kuruma rötresi azalmış, sadece fosforik asit ilavesi ile priz süreleri artmış, basınç dayanımları azalmış, kuruma rötreleri artmıştır. İkisinin beraber kullanılması durumunda fosforik asitin geciktirici özeliği ortadan kalkmış, sadece fosforik asit kullanıldığı duruma benzer bir dayanım gelişmesi oluşmuş, alçıtaşının kuruma rötresini azaltıcı etkisi kaybolmuştur. Bu iki malzemenin bir arada kullanılması tavsiye edilmemiştir (Chang ve ark., 2005).

Alkali aktivatör çeşidi, miktarı ve sıcaklığın alkali aktive edilmiş karışımlara etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat, sıcaklık olarak 20-31 ^{o}C kullanılmış ve priz süresi, işlenebilirlik gibi özelikler incelenmiştir. Alkali aktive edilmiş YFC karışımlarında priz hızlı olmakla beraber, aktivatör olarak sodyum silikat kullanılması ile bu hızlandırma etkisi artarken, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat kullanılması durumunda bu etki azalmaktadır. Sıcaklığın artması prizi hızlandırırken,

işlenebilirliği düşürmektedir. Sodyum silikat kullanılan karışımlarda sıcaklığın artması ile oluşan etkiler aynen devam etmiş, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat kullanılması durumunda sıcaklık artması ile prizde ani hızlanma ve çökmede azalma meydana gelmiştir (Zivica, 2006; Canbaz, 2007).

Sodyum klorürün kimyasal katkı olarak kullanıldığı alkali aktive edilmiş YFC'li harçların içine konulan yumuşak çeliğin korozyonunun incelendiği çalışmada, galvanostatik geçiş metodu kullanılmıştır. Korozyon oluşumu %90 nem oranında birkaç aylık bir dönemde izlenmiştir. İlk ortaya çıkan yüksek korozyon hızı düşük oranda klor katkısı kullanılması durumunda ortaya çıkmıştır. Fakat ileriki zamanlarda klor miktarının değişmesi ile farklı davranışlar görülmüştür. Klor iyonlarının bağlanmasına rağmen, boşluk yapısında serbest klor miktarı ve ölçülen pH artmıştır. Hidratasyonun ilk safhalarında sodyum klorür miktarı azalması ile pH'ın düştüğü görülmüştür. YFC'den gelen sülfür iyonlarının oksidasyonu sonucu pasif tabaka gelişmiştir. Katodik koruma altında yüksek klor içeriği korozyon hızını düşürmüştür (Holloway ve Sykes, 2005).

Kimyasal katkıların alkali aktive edilmiş YFC'li betonlara etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit-sodyum karbonat kullanılmıştır. Kimyasal katkı olarak, naftalin, formaldehit polimer esaslı akışkanlaştırıcılar, hava sürükleyiciler, su azaltıcı katkılar, rötre azaltıcı katkılar kullanılmıştır. İşlenebilirlik, rötre, basınç dayanımı gibi özelikler incelenmiştir. Hava sürükleyiciler, rötre azaltıcı katkılar ve alçıtaşı rötreyi azaltmıştır. Naftalin formaldehit esaslı akışkanlaştırıcılar ilk aşamada işlenebilirliği arttırmış, sonra ki aşamada ani prizi meydana getirmiştir. Linyosülfonat esaslı katkılar dayanım gelişmesini geciktirirken, eğilme dayanımını azaltmıştır. Linyosülfonat esaslı katkılar az miktarda rötreyi azaltırken, naftalin esaslı akışkanlaştırıcılar rötre azaltmada etkili olduğu görülmüş fakat dayanımı da azaltmıştır. Çok ince öğütülmüş YFC'nin, normal YFC ile yaklaşık % 5 yer değiştirmesi, işlenebilirlik ve dayanıma olumlu katkıları olmuştur. Hava sürükleyiciler işlenebilirliği arttırırmış, basınç dayanımını etkilememiştir. Hava sürükleyiciler alkali aktive edilmiş YFC için tavsiye edilmiştir (Bakharev ve ark., 2000, Canbaz, 2007).

Ülkemizde önemli miktarda açığa çıkan YFC kristal yapıda granüle halde ise betonda ince agrega yerine, amorf yapıda ise klinker ile birlikte öğütülerek cüruflu çimento üretiminde veya yine amorf yapıda bulunan YFC çok ince öğütülerek beton

katkı maddesi olarak değerlendirilmesi gibi çok geniş kullanım olanakları olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarda YFC'nin alkalilerle aktive edilmesi ile çimento yerine çok yüksek oranlarda kullanılabileceği görülmüştür. YFC kullanılması ile betonun kimyasal etkiler altındaki performansı ve işlenebilme artmakta, geçirimlilik azalmıştır. Özellikle deniz yapıları için önemli sorun olan sülfat etkisine karşı dayanıklılığını arttırmıştır. YFC kullanırken betonda karbonatlaşmaya karşı önlemin alması, soğuk havalarda beton dökülmesi durumunda priz hızlandırıcının katılması, donma-çözülme etkisine karşı hava sürükleyici katkı miktarının arttırılması belirtilmiştir. Erken yaşlarda dayanım beklenen yerlerde YFC kullanılmaması, kullanılması gerekiyorsa özel önlemler alınması belirtilmiştir. Türkiye'de YFC kullanımının yaygınlaştırılması önerilmiştir. YFC'nin çimento veya betonda katkı maddesi olarak kullanılmasına yönelik bir standarda ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. YFC kullanılması ile endüstriyel bir atık değerlendirildiği için hem ülkemiz ekonomisine kazancın sağlanmış olacağı, hem de çevre kirliliğinin önlenmiş olacağı vurgulanmıştır (Topçu ve Canbaz, 2006).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmaların bütünü İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzeme Laboratuvarı'nda yürütülmüştür.

3.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1 Çimento

Bu çalışmada kullanılan çimento, TS EN 197-1 (2002) ile uyumlu normal portland çimentosu (CEM I 42,5 R) olup, Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiştir. Çimentonun taze olarak kullanılmasına özen gösterilip, çalışmalar süresince nem alarak topaklaşma göstermemesi için özel koruyucu kaplar içerisinde muhafaza edilmiştir. Kullanılan CEM I 42,5 R çimentosuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmekte olup, priz başlangıç ve bitiş priz süreleri TS EN 196-3 (2000)'e göre tayin edilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi.

Kimyasal Analiz	Analiz Sonuçları (%)
SiO_2	19,71
Al_2O_3	5,20
Fe_2O_3	3,73
CaO	62,91
MgO	2,54
SO_3	2,72
KK	0,96
Na_2O	0,25
K_2O	0,90

Çizelge 3.2 : Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellikler		Sonuçlar
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)		3,15
Priz Süresi	İlk (Saat:dakika)	2:30
	Son (Saat:dakika)	3:30
İncelik	Özgül Yüzey (cm2/gr)	3250
	0,200mm elekte kalan (%)	0
	0,090mm elekte kalan (%)	0,1

3.1.2 Yüksek fırın cürufu

Bu çalışmada kullanılan YFC, Kardemir Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş. Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Blaine özgül yüzeyi ise 5500 cm^2/gr'dır. Cüruf nemden uzak ortamda muhafaza edilmiştir. Kullanılan yüksek fırın cürufunun İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi laboratuvarlarında yapılan analizler sonucu elde edilen kimyasal içeriği Çizelge 3.3'de verilmiştir. Cürufun özgül ağırlığı 2,81 gr/cm^3'tür.

Çizelge 3.3 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriği.

Kimyasal Analiz	Analiz Sonuçları (%)
SiO_2	40,5
Al_2O_3	1,2
Fe_2O_3	10,3
CaO	32,2
MgO	11,3
SO_3	1,3
K_2O	1,1
Na_2O	0,35
Cl^-	0,0105
KK	1,9

3.1.3 Su

Deneylerde karışım suyu olarak ve kür havuzlarında kullanılan su İstanbul şehir şebekesinden alınan içilebilir sudur. Beton karışım ve bakım suyunun kalitesi ile

ilgili Türk Standardı TS EN 1008 (2003) olup, karma ve bakım suyu, genel anlamda içilebilir su olarak ifade edilmektedir.

3.1.4 Sodyum karbonat

YFC'yi aktive etmek için kullanılan sodyum karbonat (Na_2CO_3) Tıp Kim San Ltd. Sti.'den saglanmıstır. Sodyum kabonat piyasada kolay ve istenilen miktarda bulunabilir, ucuzdur. Sodyum türevlerinden birisidir. Ülkemizde soda veya yıkama sodası olarak bilinmektedir. Tüm alkali metal tuzları arasında sodyum karbonat sanayi açısından en önemlisidir. Bu bilesik, belirli deniz bitkilerinde ve bazı kayalarda mineral halinde bulunur. Hesaplarda kullanılan molekül ağırlığı 106gr/mol'dür.

3.1.5 Sodyum hidroksit

YFC'yi aktive etmek için kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) Tıp Kim San Ltd.Sti.'den saglanmıstır. Piyasada kostik olarak ta bilinen sodyum hidroksitin, ucuz olması, kolay ve istenilen miktarlarda temin edilebilmesi avantajlarındandır. Beyaz bir katı haldedir, akkor derecede uçucudur, suda ısı yayarak çözünür ve nem kaparak bozunur. Potasyum hidroksitle aynı özellikleri gösteren fakat ondan daha az yakıcı olan güçlü bir bazdır. Hesaplarda kullanılan molekül ağırlığı 40 gr/mol'dür.

3.1.6 Sodyum silikat

YFC'yi aktive etmek için kullanılan sodyum silikat (SiO_2)(Na_2O)(H_2O) Tıp Kim San Ltd.Sti.'den saglanmıstır. Sodyum silikat cam suyu olarakta bilinir. Başta seramik olmak üzere bir çok sektörde kullanılır. Kolayca ve istenilen miktarda bulunabilir. Ucuzdur. Çalışmada kullanılan sodyum silikat suda çözünmüş haldedir. Saf, kokusuz ve su berraklığındadır. Çalışma süresince cam kapta muhafaza edilmiştir. Hesaplarda kullanılan molekül ağırlığı 162gr/mol'dür. Karışımlarda su molekülleri hesaba katılmıştır.

3.1.7 Agrega

Çalışmalarda iki çeşit agrega kullanılmıştır. Bunlar; CEN standart kumu ve krom üretimi sırasında fabrika atığı olarak ortaya çıkan krom cürufudur.

3.1.7.1 CEN standart kumu

Limak Batı Çimento San. Ve Tic. A.Ş. Trakya Çimento Fabrikası tarafından hazırlanan TSE EN 196-1'e uygun olan CEN Standart Kumu kullanılmıştır. CEN Standart Kumunun TS EN 196-1 de tarif edilen tane büyüklüğü dağılımı Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4 : CEN standart kumu tane büyüklüğü dağılımı.

Kare Göz Açıklığı (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Elekte Kalan Yığışımlı (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

3.1.7.2 Krom cürufu

Eti Krom A.Ş.'den araştırma amaçlı temin edilen krom cürufu, Elazığ'da bulunan fabrikalarda ferrekrom üretimi sonucu elde edilmiştir. Ferrekrom üretimi %6 - %8 oranlarında cürufla sonuçlanır. CEN standart kumu ile aynı tane büyüklüğü dağılımını sağlayacak şekilde granüle edilmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi laboratuvarlarında yapılan analizler sonucu krom cürufunun kimyasal içeriği Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Krom cürufunun kimyasal içeriği.

Kimyasal Analiz	Analiz Sonuçları (%)
SiO_2	59,72
Al_2O_3	7,87
Fe_2O_3	1,43
CaO	23,15
MgO	5,67
S	0,28
Na_2O	0,02
K_2O	0,12
Klorür (Cl^-)	0,0547
H_2O	0,00
$CaCO_3 + MgCO_3$	---
KK	0,58
Çözünmeyen Kalıntı	---

3.1.8 Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı

Taze beton ve harç karışımlarında işlenilebilirliği artırmak, erken mukavemet ve nihai yüksek performans sağlamak amacıyla; karma suyunu ciddi anlamda azaltan ve klor içermeyen yeni nesil bir süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'den temin edilen Sikament FFN'dir. %0,8 - %3 arasında en iyi performansı gösteren bu katkı çalışmada %2 oanında kullanılmıştır. Yoğunluğu 20ºC'de 1,15 – 1,19 kg/l'dir.

3.2 Üretilen Harç Tipleri

Önceki bölümde özellikleri verilen yüksek fırın cürufu, çimento ve agregalar kullanılarak üç aşamalı harç üretimi yapılmıştır. Harç üretimlerinde aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum silikat (sıvı formda) ve sodyum karbonat kullanılmıştır. Harç üretimi 5 litre kapasiteli paslanmaz çelikten yapılmış olan ve palet hızı iki kademeli olarak ayarlanabilen karıştırıcı ile yapılmıştır. TS EN 196-1(2009)'a uyumlu olan ve Şekil 3.1'de gösterilen karıştırıcının palet hızı ise Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

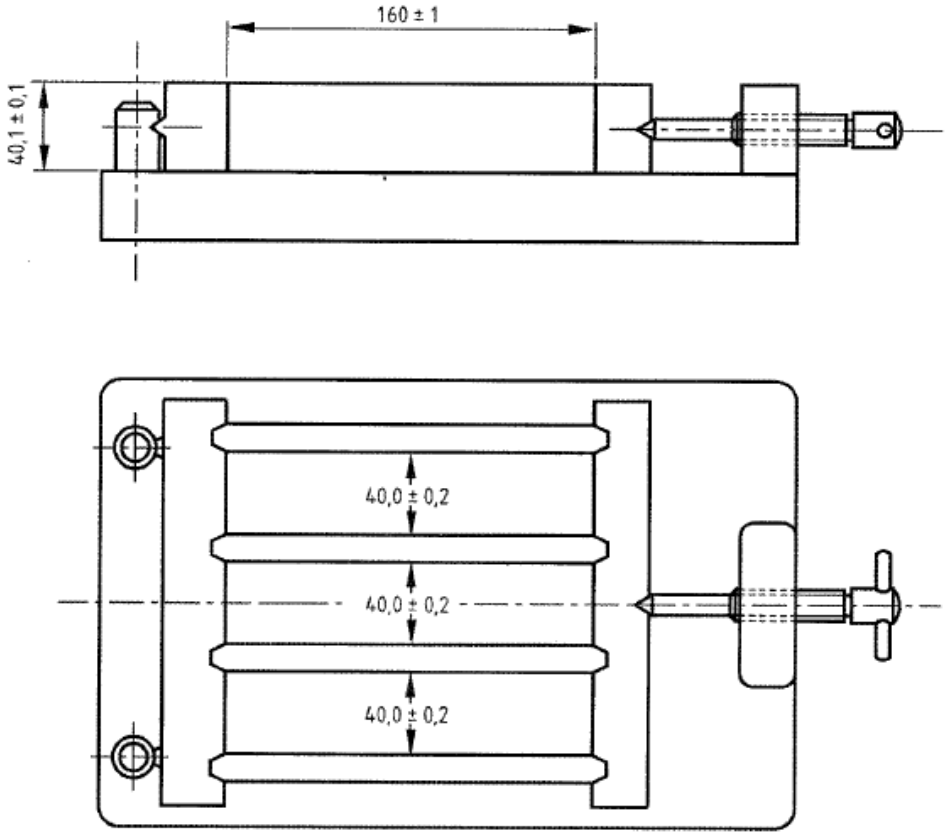


Şekil 3.1 : Harç üretiminde kullanılan karıştırıcı.

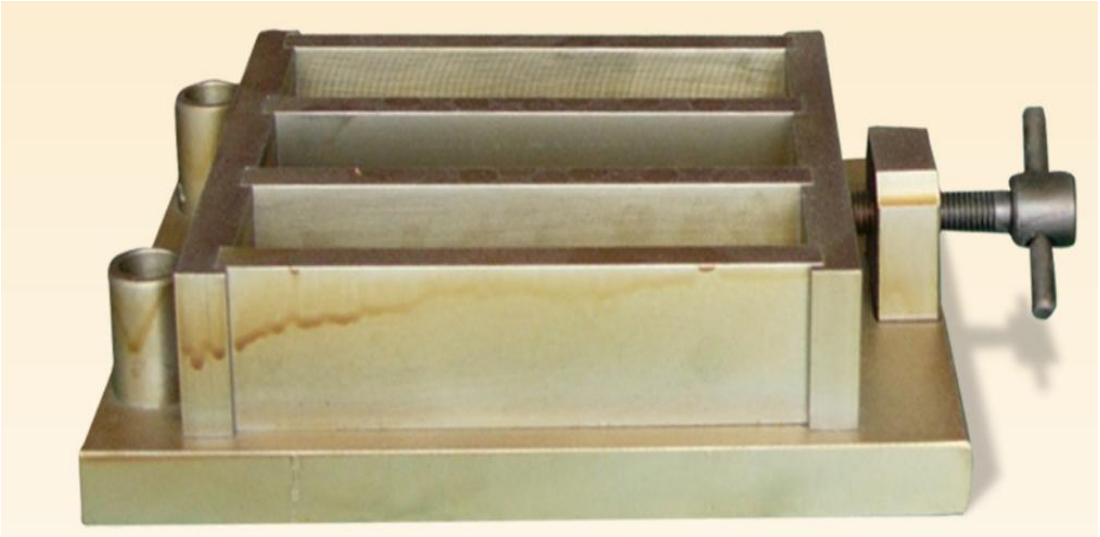
Çizelge 3.6 : Karıştırıcı paletin hızları.

	Kendi Ekseni Etrafında Dönme Hızı min^{-1}	Yörüngesel Dönme Hızı min^{-1}
Düşük Hız	140 ± 5	62 ± 5
Yüksek Hız	285 ± 10	125 ± 10

Üretilen harçlar 40x40x160mm ebatlarında standart kalıplara yerleştirilmiştir. Standart harç kalıplarının ölçüleri Şekil 3.2'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Ayrıca çalışmalarda kullanılan kalıpların görseli Şekil 3.3'de incelenebilir. Kullanılan kalıplar her üretimden önce özenle temizlenmiş ve harç konulmadan önce ince bir film tabakası halinde mineral esaslı kalıp yağı sürülmüştür. Böylece kalıp söküm işleminin numunelere minimum etkisi sağlanmıştır. Harcın kalıba konulmasından sonra TS EN 196-1(2009)'de tarif edildiği şekilde sarsma tablası yardımıyla standart bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.2 : Tipik harç kalıplarının boyutları (mm).



Şekil 3.3 : Çalışmalarda kullanılan kalıplar.

Yürütülen çalışmanın ilk aşamasında her tip numuneden üç tekrarlı üretim yapılarak 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları değerlendirilmiş ve buna göre çalışmanın sonraki aşamaları şekillendirilmiştir. Çalışmanın birinci aşamasının amacı üç tip aktivatörle üretilen numunelerin basınç dayanımlarını karşılaştırmaktır. Birinci aşamaya konu olan karışım oranları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7'de görüldüğü üzere deneysel çalışmaların bütününde su ve agrega oranları sabit tutulmuştur. Kontrol numunesinde yüksek fırın cürufu ve alkali bulunmamaktadır. Alkali oranları sodyum molekülünün yüksek fırın cürufuna oranı %5 olarak sabitlenerek hesaplanmıştır. Suda çözünmüş yapıda ki sodyum silikatlı malzemelerde içeriğinde ki su molekülleri de hesaba katılmıştır. D, E ve F kodlu numunelerde bağlayıcı olarak; YFC ve çimento bir arada kullanılmıştır. Bu tip harçlarda bağlayıcının %25'ini çimento, %75'ini YFC oluşturmaktadır. Aktivatör olarak kullanılan alkali ise yine aynı metotla belirlenmiştir. Alkali içeriğinde ki Na+ molekülünün, YFC'ye kütlece oranı %5 olarak sabittir. Birinci aşamada üretilen numuneler 20ºC'de kürlenmiştir.

Birinci aşamada üretilen harçların basınç dayanımları kontrol numunesiyle karşılaştırılmış ve neticesinde "sodyum hidroksit (NaOH)" ile aktive edilen YFC harçlarının çeşitlendirilmesine gidilmiştir. Erken yaş mekanik özelliklerinde ki değişimi gözlemlemek için kür koşulları ve nihai mekanik özelliklere etkisini değerlendirmek için Na^+ konsantrasyonu çeşitlendirilmiştir.

Bu seri harçlarda kür suyunun sıcaklıkları 20ºC , 40ºC, 60ºC ve 80ºC olarak değişkenlik göstermektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda ki kür süreleri de değişkendir. Çalışmada kür sıcaklıkları ayarlanırken sıcaklık artışı 24 saat içinde tamamlanmış, numuneler ani sıcaklık değişimine maruz bırakılmamıştır.

Na^+ konsantrasyonu ise "%2,5", "%5", "%7,5" ve "%10" oranlarında çeşitlendirilmiş ve optimum Na+ oranı aranmıştır. İkinci aşamada incelenen harçların karışım oranları Çizelge 3.8'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu harçlar iki seri olarak üretilmiş olup 7 ve 28 günlük mekanik özellikleri incelenmiştir.

Çalışmanın son aşamasında ise agrega olarak CEN standart kumu yerine krom cürufu kullanılarak daha çevreci ve daha ekonomik bir malzeme elde edilmeye çalışılmıştır. Çizelge 3.9'da verilen üçüncü aşama karışım oranları incelenebilir. Bu aşamada iki seri harç üretilmiş olup 7 ve 28 günlük mekanik özellikler incelenmiştir. İlk iki aşamadan farklı olarak bu harçlarda su/bağlayıcı oranı da değişkenlik göstermektedir ve 0,5 yerine 0,3 oranında harçlarda incelemeye tabi tutulmuştur. Su/bağlayıcı oranı 0,3 olan harçların işlenilebirliğini artırmak için bağlayıcının %2 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kür koşullarının farklılık göstermesine karşın bu seri harçlarda aktivatör olarak sadece "sodyum hidroksit (NaOH)" kullanılmıştır ve Na+ konsantrasyonu %5 olarak sabittir.

Üretilen numunelerin tamamında genel prensip olarak aktivatörler (sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat) karma suyu içerisinde çözündükten sonra harçlara eklenmştir. Bütün moleküllerin çözünmesi için sodyum karbonat çözeltileri karıştırma çubuğu yardımıyla hazırlanmıştır. Sodyum silikat sıvı formda olduğu için ağzı kapalı bir kapta karma suyuna ilave edilip çalkalanmıştır. Sodyum hidroksit ise yine karıştırma çubuğu yardımı ile suda çözünmesi sağlanmıştır. Birinci bölümde anlatıldığı üzere sodyum hidroksitin suda çözünmesi ekzotermik bir kimyasal reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucu ciddi miktarda ısı açığa çıkar ve karma suyunun sıcaklığı artar. Sodyum hidroksit aktivatörü ile üretilen YFC içerikli harçların priz süresini ve priz ısısını etkilememesi için hazırlanan karma suyunun oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir.

Çizelge 3.7 : Karışım oranları (I. Aşama).

Numune Kodu	Çimento	YFC	ALKALİ			Agrega		SU	Süper Akış.	Na^+	Kür Koşulu
			NaOH	*Na_2CO_3*	*Na_2SiO_3*	CEN	Krom C.				
Kontrol I	1,00	-	-	-	-	3,00	-	0,50	-	-	20˚C
A	-	1,00	***0,09***	-	-	3,00	-	0,50	-	% 5	20˚C
B	-	1,00	-	***0,12***	-	3,00	-	0,50	-	% 5	20˚C
C	-	1,00	-	-	***0,18***	3,00	-	0,50	-	% 5	20˚C
D	0,25	0,75	***0,07***	-	-	3,00	-	0,50	-	% 5	20˚C
E	0,25	0,75	-	***0,09***	-	3,00	-	0,50	-	% 5	20˚C
F	0,25	0,75	-	-	***0,14***	3,00	-	0,50	-	% 5	20˚C

Çizelge 3.8 : Karışım oranları (II. Aşama).

Numune Kodu	Çimento	YFC	ALKALİ			Agrega		SU	Süper Akış.	Na^+	Kür Koşulu
			NaOH	*Na_2CO_3*	*Na_2SiO_3*	CEN	Krom C.				
A-3-40	-	1,00	***0,09***	-	-	3,00	-	0,50	-	%5	40˚C (İlk 3 Gün)
A-7-40	-	1,00	***0,09***	-	-	3,00	-	0,50	-	%5	40˚C (İlk 7 Gün)
A-3-60	-	1,00	***0,09***	-	-	3,00	-	0,50	-	%5	60˚C (İlk 3 Gün)
A-7-60	-	1,00	***0,09***	-	-	3,00	-	0,50	-	%5	60˚C (İlk 7 Gün)
A-3-80	-	1,00	***0,09***	-	-	3,00	-	0,50	-	%5	80˚C (İlk 3 Gün)
A-7-80	-	1,00	***0,09***	-	-	3,00	-	0,50	-	%5	80˚C (İlk 7 Gün)
X	-	1,00	***0,045***	-	-	3,00	-	0,50	-	%2,5	20˚C
Y	-	1,00	***0,135***	-	-	3,00	-	0,50	-	%7,5	20˚C

Çizelge 3.9 : Karışım oranları (III. Aşama).

Numune Kodu	Çimento	YFC	ALKALİ			Agrega		SU	Süper Akış.	Na^+	Kür Koşulu
			NaOH	*Na_2CO_3*	*Na_2SiO_3*	CEN	Krom C.				
Kontrol II	1,00	-	-	-	-	-	3,00	0,50	-	-	20˚C
A-K	0,00	1,00	***0,09***	-	-	-	3,00	0,50	-	%5	20˚C
A-K-7-80	0,00	1,00	***0,09***	-	-	-	3,00	0,50	-	%5	80˚C (İlk 7 Gün)
G	0,00	1,50	***0,14***	-	-	-	3,00	0,50	0,03	%5	20˚C

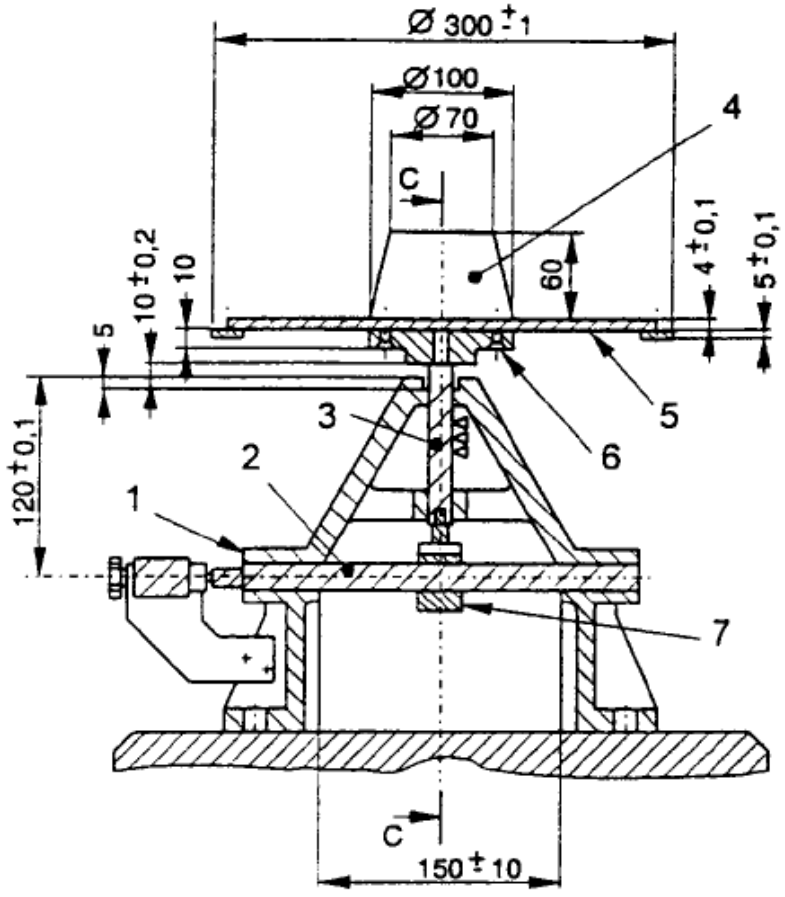
3.3 Yapılan Deneyler

3.3.1 Taze harç üzerinde yapılan deneyler

Harç üretimi sırasında, sertliğini kazanmadan birim ağırlık ve yayılma deneyi olmak üzere iki adet deney yapılmıştır.

Birim ağırlık deneyleri standart 200ml'lik kapların harç ile doldurulup tartılması şeklinde yapılmıştır.

Yayılma deneyinde ise ölçüleri Şekil 3.4'de verilen yayılma tablası ve kesik koni kullanılmıştır. Deney TS EN 1015-3'de tarif edildiği şekilde yapılmıştır. Deneye başlamadan önce tabla yüzeyi nemli bir bez ile temizlenir ve kesik koni harç ile doldurulur. Kesik koni kaldırıldıktan sonra 15 defa düşürülen tabla yüzeyine yayılan harcın birbirine dik doğrultuda ki çapı ölçülür ve ortalaması alınır.



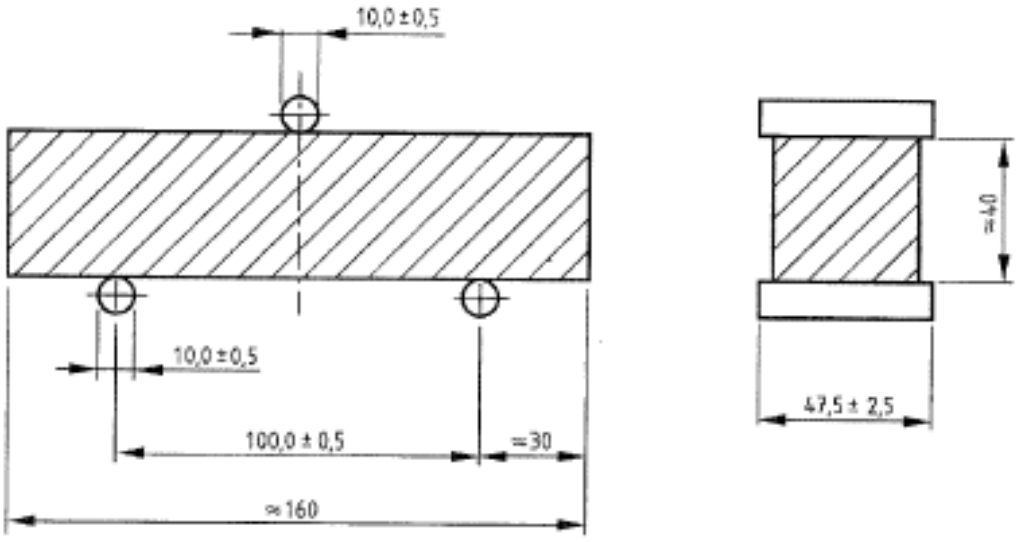
Şekil 3.4 : Yayılma tablası ve kesik koninin boyutları (mm).

3.3.2 Sertleşmiş harçlar üzerinde yapılan deneyler

Kalıptan çıkarıldıktan sonra (kalıpta bekleme süresi 24 saattir) 7, 28 ve 90 gün kür koşullarında muhafaza edilen numuneler üzerinde yapılan deneylerdir.

3.3.2.1 Eğilme dayanımı tayini

Prizma şekilli numune, eğilme cihazına yan yüzeylerinden biri mesnet silindirleri üzerine gelecek şekilde, boyuna ekseni mesnet silindirlerine dik şekilde yerleştirilir. Yük, yükleme silindiri vasıtasıyla numunenin karşıt yüzeyinden, mesnetleri ortalayacak şekilde, düşey olarak uygulanır. Düzenek Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Eğilme dayanımı tayini için yükleme düzeneği (mm).

Eğilme deneyinden sonra iki parçaya bölünen numune her bir parçası nemli bir bez içinde saklanarak basınç dayanım deneyine kadar muhafaza edilir. Eğilme dayanımı; R_f, MPa biriminde **(3.1)** bağıntısından hesaplanır.

$$R_f = \frac{1{,}5 \times F_f \times l}{b^3} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Burada;

R_f : Eğilme dayanımı, MPa,

b : Prizma şekilli numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu, mm

F_f : Kırılma anında numunenin ortasından uygulanan yük, N

l : Mesnet silindirleri arasında ki mesafe, mm'dir.

3.3.2.2 Basınç dayanımı tayini

Eğilme deneyinden sonra iki parçaya bölünen numuneler üzerinde basınç cihazı ile yapılır. Tüm deneyler boyunca yükleme hızı sabit alınmıştır. Deney TS EN 196-1'de tarif edildiği gibi yapılmıştır. Basınç dayanımı sonuçları en yakın 0,1 MPa değerine yuvarlatılarak gösterilecektir.

Basınç dayanımı; R_c, MPa biriminde **(3.2)** bağıntısından hesaplanır.

$$Rc = \frac{Fc}{1600} \qquad \textbf{(3.2)}$$

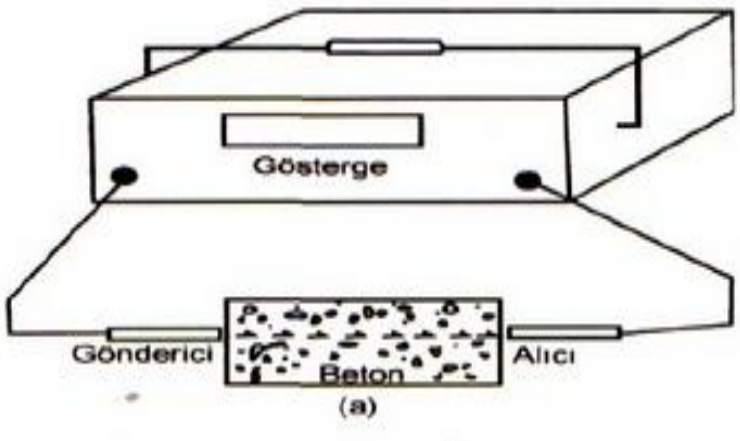
Burada;

R_c : Basınç dayanımı, MPa,

F_c : Kırılmada ki en büyük yük, N'dir.

3.3.2.3 Ultra ses geçiş hızı tayini

Bu yöntemle, frekansları 20-200 kHz düzeyinde olan ultrasonik ses dalgalarının sertleşmiş harç numunesi içindeki yayılma hızı ölçülmüş ve basınç dayanımlarıyla ilgi kurulmaya çalışılmıştır. Ses dalgalarının kütle içinde yayılma hızı numunenin çatlakları ve boşlukları hakkında fikir verebilir. Şekil 3.6'da gösterilen ultrasonik test aygıtı, ses dalgasının, prizma şeklinde ki numunenin dalganın verildiği ve geri alındığı yüzeyleri arasında ki uzaklığı ne kadar zamanda geçtiğini mikosaniye biriminde ölçmektedir. Ultrasonik ses dalgasının hızı ile beton basınç dayanımı arasında ilişki kurulabilir. (Erdoğan, 2003)



Şekil 3.6 : Ultrasonik test aygıtı.

Ultrasonik dalga hızı; V, m/s biriminde aşağıda ki bağıntıdan **(3.3)** hesaplanır.

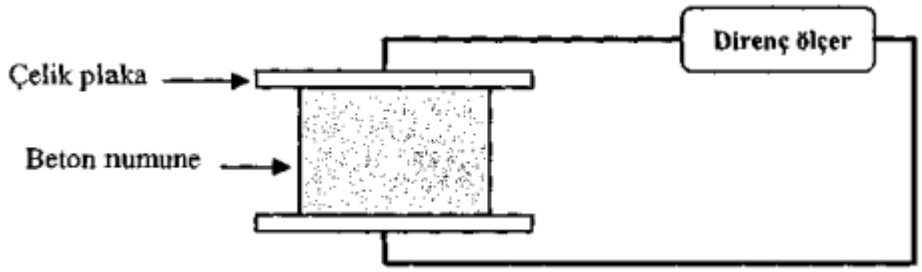
$$V = \frac{S}{t} 10^6 \qquad \textbf{(3.3)}$$

Burada;

- V : Ultrasonik dalga hızı, m/s
- S : Prizma numunenin iki uç yüzeyi arasında ki mesafe, m
- t : Ultrasonik dalganın gönderilişi ve alınışı arasında geçen süre, mikrosaniye‘dir.

3.3.2.4 Elektriksel direnç ölçümü

Sertleşmiş harç numuneleri üzerinde iki elektrot yönteminde ölçümler yapılmıştır. Numuneler iki plak arasına yerleştirildikten sonra elektriksel dirençleri, bir direnç ölçer ile okunur. İki elektrot yöntemi düzeneği Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Sonuçlar “Ohm Kanunu” esas alınarak değerlendirilecektir.



Şekil 3.7 : Direnç ölçüm düzeneği.

3.3.2.5 Ağırlıkça su emme deneyi

Sertleşmiş harç numunesinin su içeriğini tayin etmek için yapılan deneydir. Kür havuzunda bekletilen numune kurulanıp, tartılır. 24 saat etüvde bekletilen numuneler etüv sonrası tekrar tartılırak ikinci ölçüm alınır. 24 saat arayla yapılan iki ölçüm arasında ki fark su içeriği olarak kabul edilir ve ilk ağırlığa oranlanarak % cinsinden gösterilir.

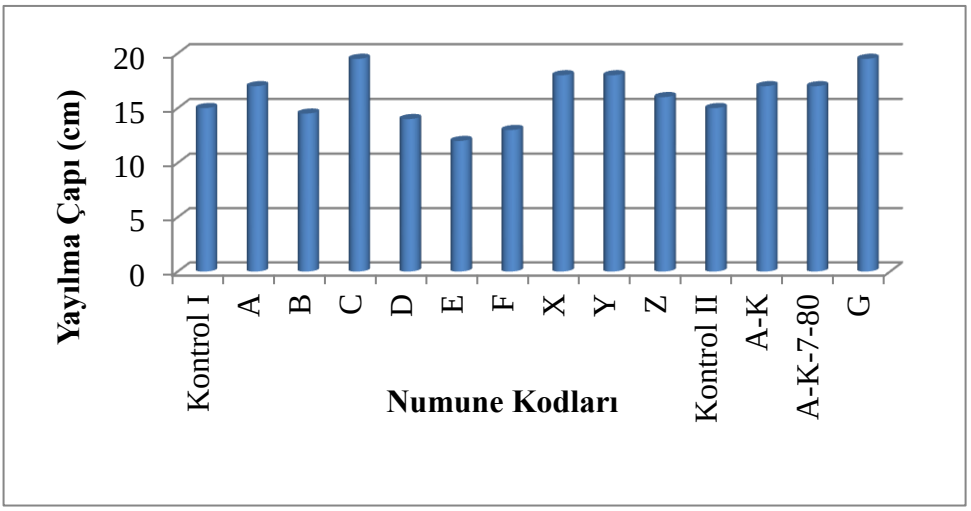
4. DENEY SONUÇLARI, BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Taze Harç Deney Sonuçları

Taze harç deney sonuçları Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Birim ağırlık ve yayılma tablası deneyi sonuçları.

Numune Kodu	Birim Ağırlık ton/m^3	Yayılma Deneyi cm
Kontrol I	2,21	15
A	2,26	17
B	2,24	14,5
C	2,19	19,5
D	2,18	14
E	2,01	12
F	1,24	13
X	2,23	18
Y	2,26	18
Z	2,28	16
Kontrol II	2,21	15
A-K	2,25	17
A-K-7-80	2,25	17
G	2,19	19,5



Şekil 4.1 : Yayılma çapı değerleri.

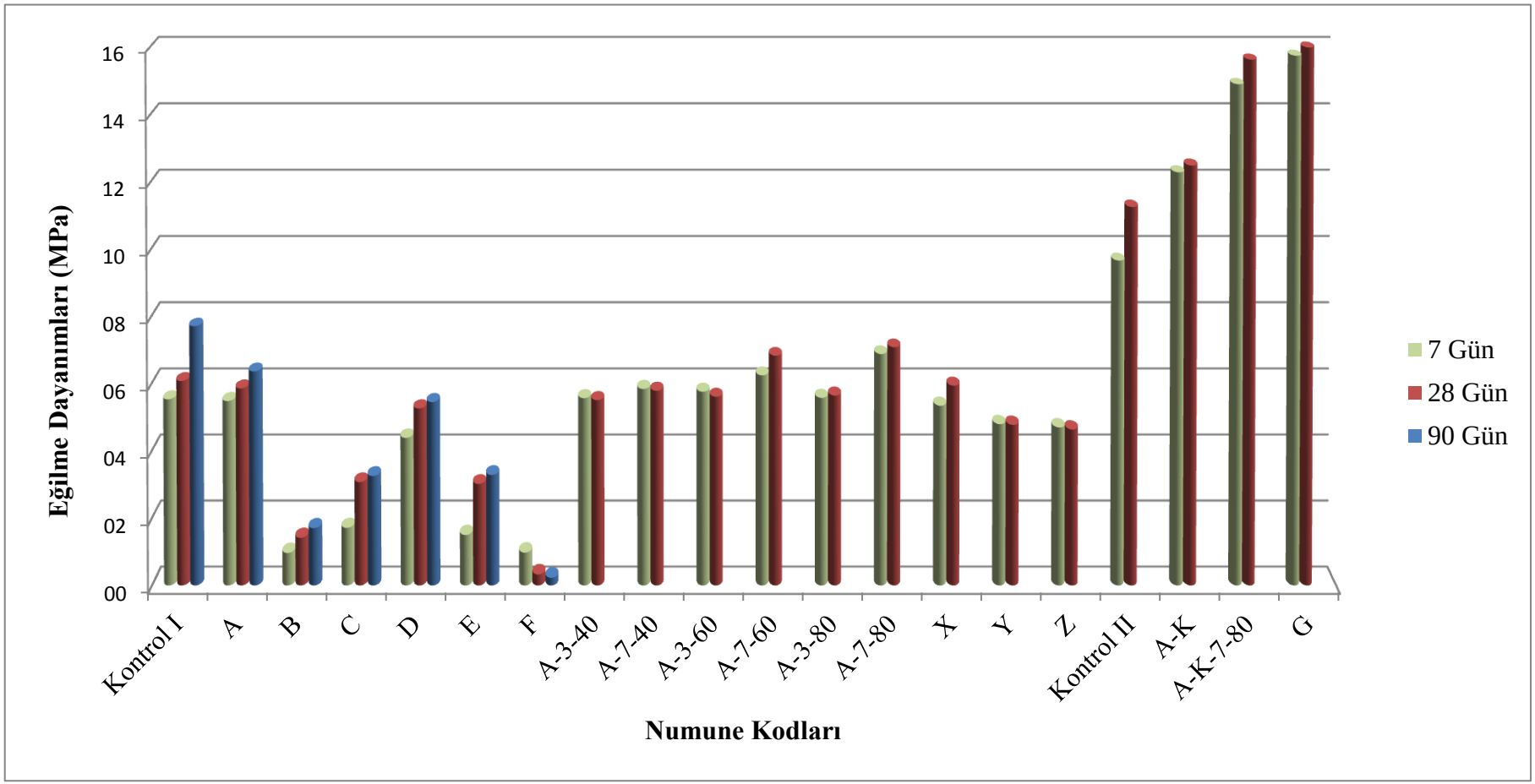
4.2 Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları

4.2.1 Eğilme dayanımı

Eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Eğilme dayanım değerleri (MPa).

Numune Kodu	Numune Yaşı		
	7 Gün	28 Gün	90 Gün
Kontrol I	5,6	6,1	7,7
A	5,5	5,9	6,4
B	1,0	1,4	1,7
C	1,7	3,1	3,3
D	4,4	5,3	5,5
E	1,5	3,0	3,3
F	1,0	0,3	0,2
A-3-40	5,6	5,5	-
A-7-40	5,9	5,8	-
A-3-60	5,8	5,6	-
A-7-60	6,3	6,8	-
A-3-80	5,6	5,7	-
A-7-80	6,9	7,1	-
X	5,4	6,0	-
Y	4,8	4,8	-
Z	4,7	4,7	-
Kontrol II	9,7	11,3	-
A-K	12,3	12,5	-
A-K-7-80	14,9	15,6	-
G	15,8	16,0	-



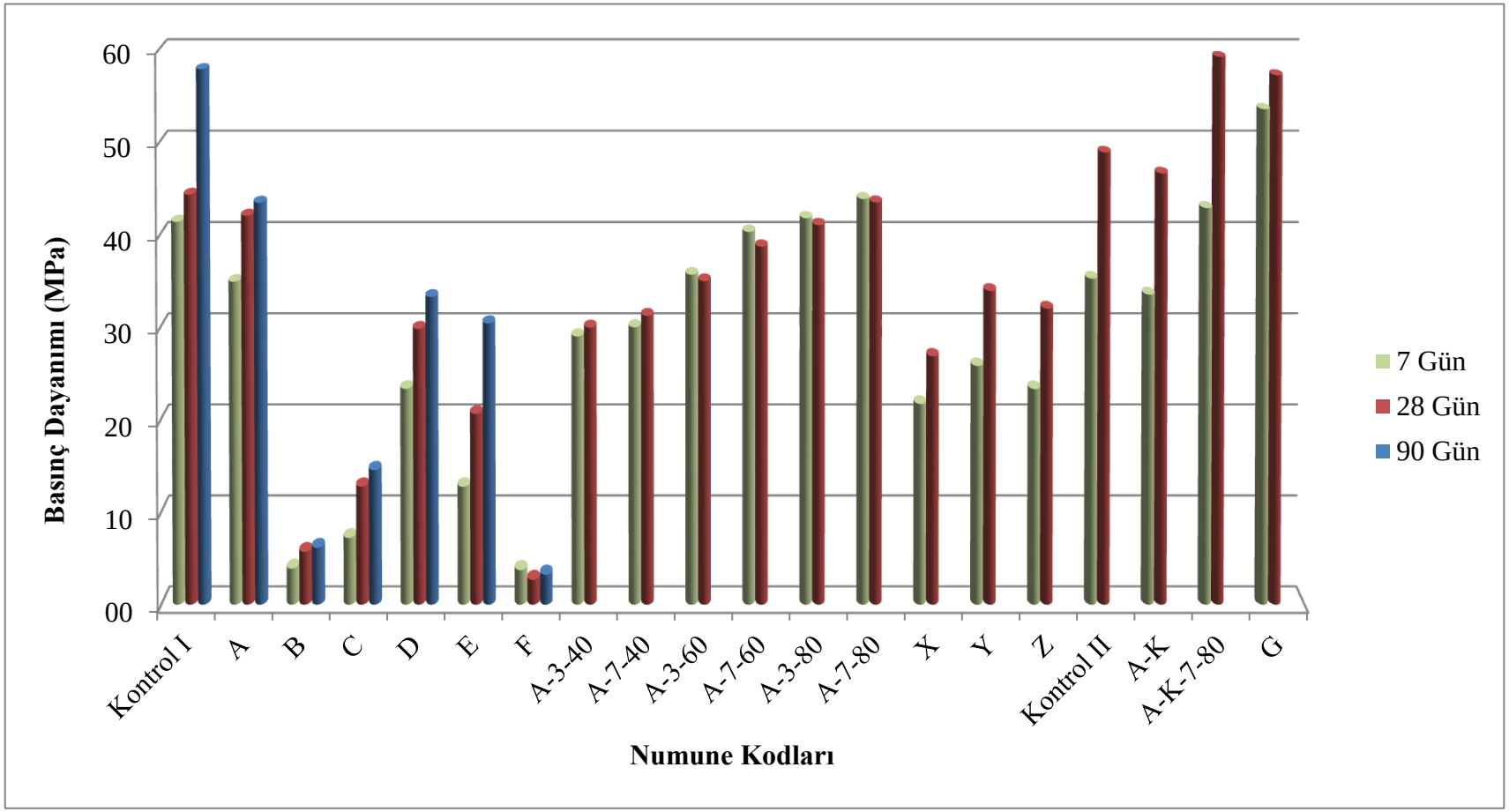
Şekil 4.2 : Karşılaştırmalı eğilme dayanım değerleri.

4.2.2 Basınç dayanımı

Basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.3 ve Şekil 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Basınç dayanım değerleri (MPa).

Numune Kodu	Numune Yaşı		
	7 Gün	28 Gün	90 Gün
Kontrol I	41,4	44,4	57,9
A	35,0	42,1	43,5
B	3,9	5,7	6,2
C	7,2	12,8	14,6
D	23,4	29,8	33,3
E	12,8	20,7	30,5
F	3,7	2,7	3,2
A-3-40	29,0	30,0	-
A-7-40	30,0	31,3	-
A-3-60	35,7	35,0	-
A-7-60	40,3	38,7	-
A-3-80	41,8	41,1	-
A-7-80	43,9	43,5	-
X	21,7	26,9	-
Y	25,8	34,0	-
Z	23,3	32,0	-
Kontrol II	35,3	48,9	-
A-K	33,6	46,6	-
A-K-7-80	42,9	59,2	-
G	53,6	57,2	-



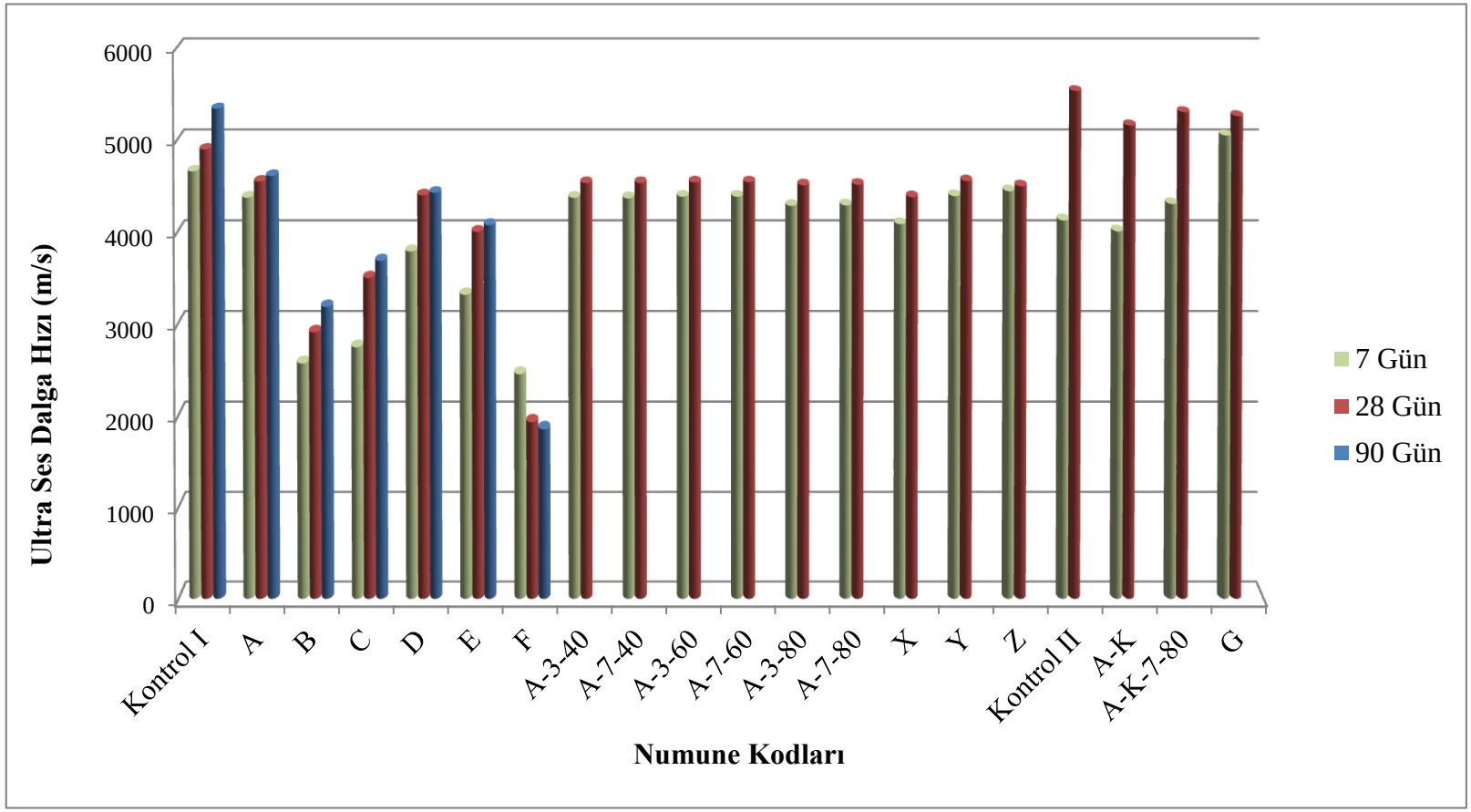
Şekil 4.3 : Karşılaştırmalı basınç dayanım değerleri.

4.2.3 Ultra ses geçiş hızı

Ultra ses dalgasının numuneler üzerinde yayılma hızı Çizelge 4.4 ve Şekil 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Ultra ses geçiş hızı değerleri (m/s)

Numune Kodu	Numune Yaşı		
	7 Gün	28 Gün	90 Gün
Kontrol I	4665	4903	5345
A	4380	4554	4615
B	2576	2914	3191
C	2752	3506	3692
D	3794	4404	4432
E	3324	4007	4082
F	2459	1937	1860
A-3-40	4378	4539	-
A-7-40	4372	4539	-
A-3-60	4390	4545	-
A-7-60	4390	4545	-
A-3-80	4290	4513	-
A-7-80	4295	4520	-
X	4092	4384	-
Y	4396	4558	-
Z	4449	4503	-
Kontrol II	4131	5536	-
A-K	4012	5161	-
A-K-7-80	4310	5307	-
G	5053	5263	-



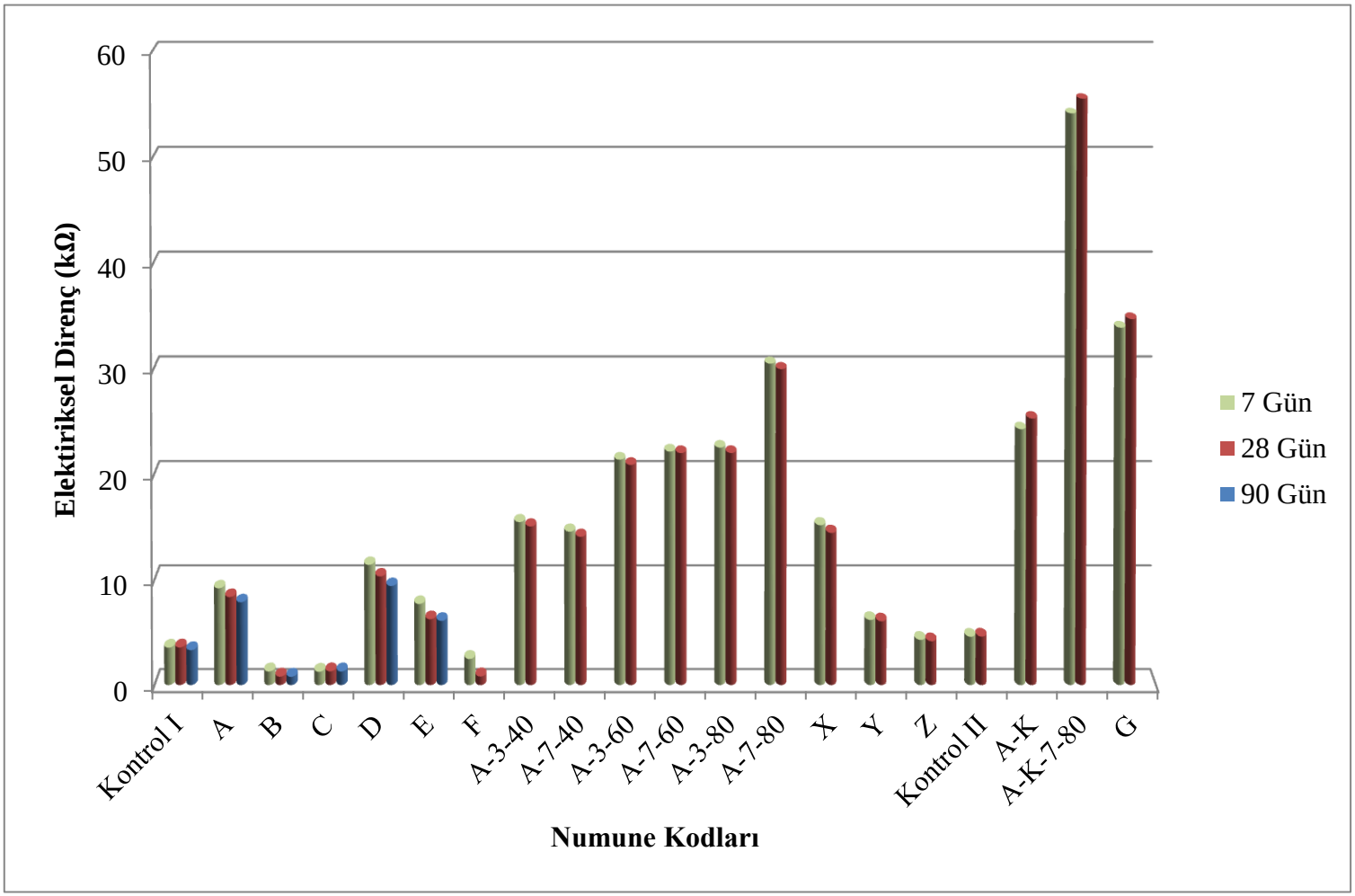
Şekil 4.4 : Karşılaştırmalı ultra ses dalgası hızları.

4.2.4 Elektiriksel direnç

Numuneler üzerinde elektirik direnci ölçümü sonuçları Çizelge 4.5 ve Şekil 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Elektiriksel direnç değerleri (kΩ).

Numune Kodu	Numune Yaşı		
	7 Gün	28 Gün	90 Gün
Kontrol I	3,574	3,585	3,331
A	9,233	8,405	7,905
B	1,293	0,797	0,783
C	1,267	1,305	1,295
D	11,474	10,375	9,457
E	7,741	6,280	6,127
F	2,488	0,817	-
A-3-40	15,523	15,112	-
A-7-40	14,613	14,127	-
A-3-60	21,433	20,934	-
A-7-60	22,200	22,055	-
A-3-80	22,573	22,062	-
A-7-80	30,505	29,988	-
X	15,221	14,496	-
Y	6,213	6,085	-
Z	4,313	4,180	-
Kontrol II	4,612	4,630	-
A-K	24,310	25,320	-
A-K-7-80	54,120	55,500	-
G	33,900	34,710	-



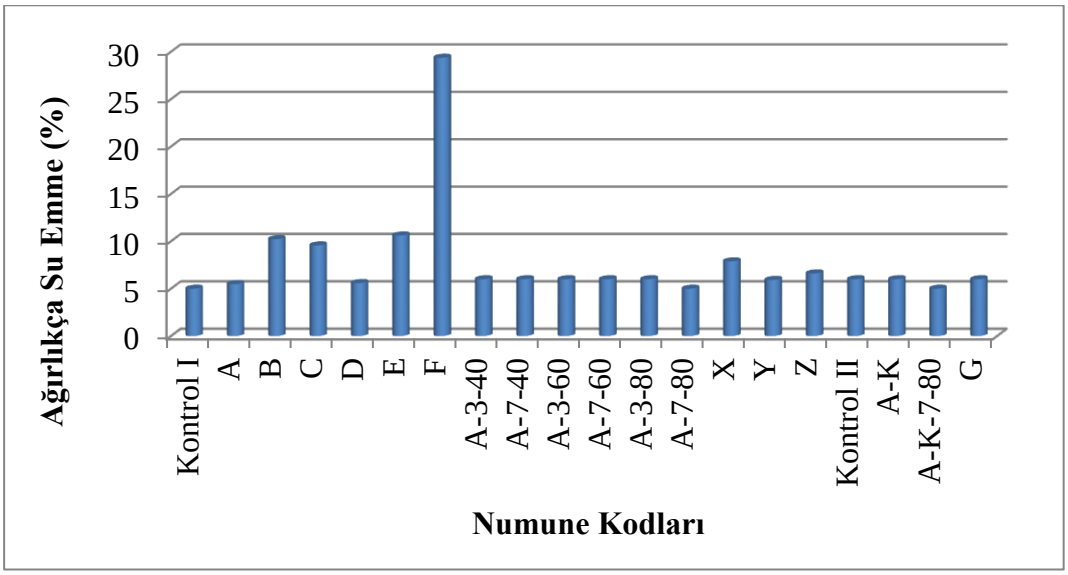
Şekil 4.5 : Karşılaştırmalı elektiriksel direnç değerleri.

4.2.5 Ağırlıkça su emme

Etüv sonucu tespit edilen ağırlıkça su emme değerleri Çizelge 4.6 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Ağırlıkça su emme oranları (%).

Numune Kodu	Su Emme Oranı (%)
Kontrol I	5
A	5
B	10
C	10
D	6
E	11
F	29
A-3-40	6
A-7-40	6
A-3-60	6
A-7-60	6
A-3-80	6
A-7-80	5
X	8
Y	6
Z	7
Kontrol II	6
A-K	6
A-K-7-80	5
G	6



Şekil 4.6 : Su emme oranlarının karşılaştırmalı grafiği.

4.3 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Birim ağırlık ve yayılma tablası deneyleri göz önüne alındığında “D”, “E” ve “F” kodlu numunelerin, kontrol numunesine göre daha boşluklu bir yapıya sahip olduğu ve işlenebilirliğinin daha az olduğu söylenebilir.

Bağlayıcı olarak YFC ve çimentonun beraber kullanıldığı bu harçların üretimi sırasında priz süresinin kısa olduğu da gözlenmiştir. Özellikle “F” kodlu, sodyum silikat ile aktive edilen, çimento+YFC sistemli harcın birim ağırlık değeri çok düşüktür. Yapısal boşlukları Şekil 4.7’ye dikkatli bakılırsa görülebilmektedir.

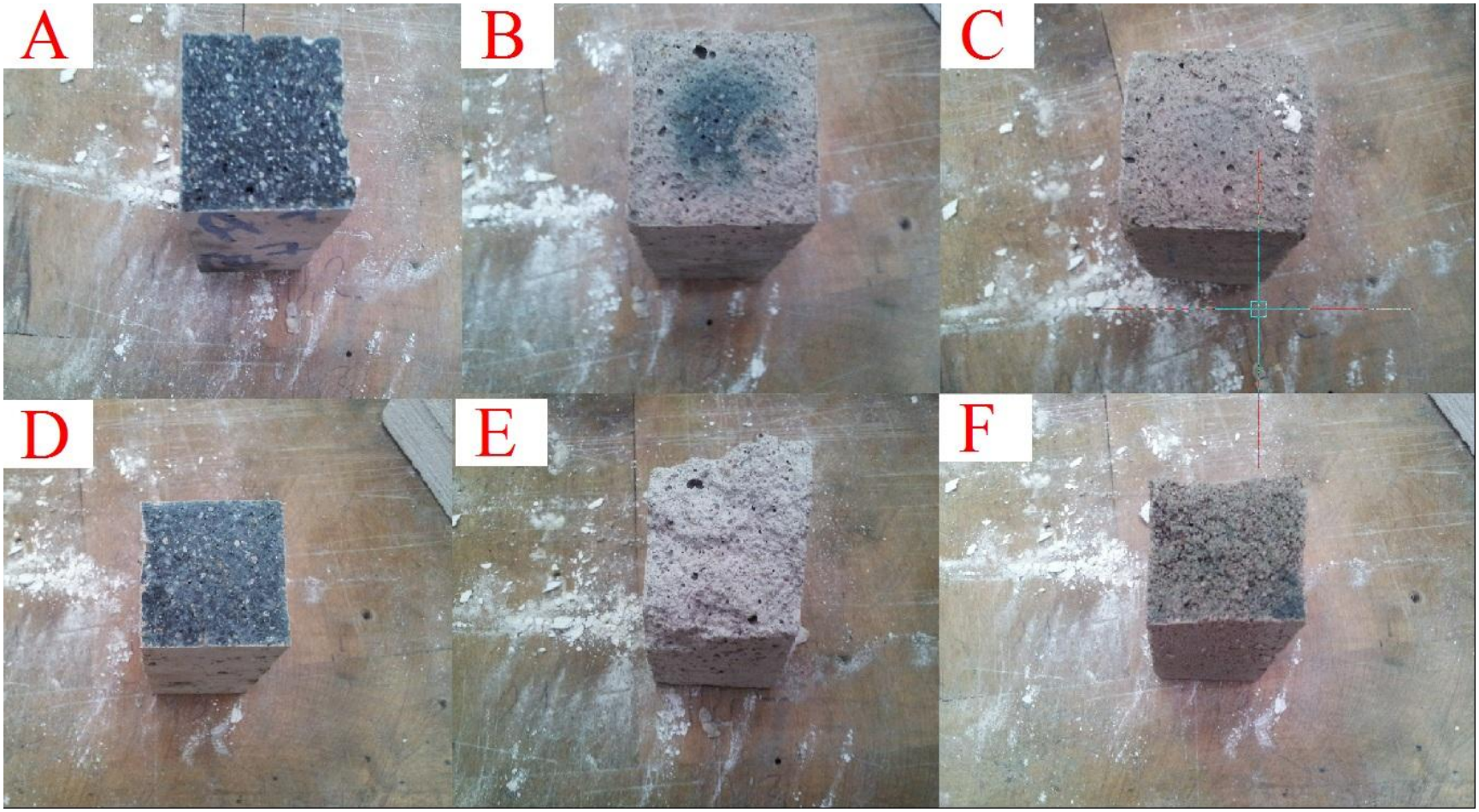
Kıvamı kontrol numunesine en yakın olan sodyum karbonat ile aktive edilen “B” harcıdır. Onun dışında bağlayıcı olarak sadece YFC kullanılan diğer harç tiplerinin de (“A” ve “C”) işlenebilirliği iyi seviyededir.

Yayılma tablası deneyinde en geniş çapa ulaşan harçlar “C” ve “G” harçlarıdır. “C” harcı bilindiği üzere sodyum silikatla aktive edilmiş ve sodyum silikat sıvı formda karma suyuna katılmıştır. “G” tipi harcın da ise Su/YFC oranı değeri 0,3’tür. Bu harcın üretimi sırasında karma suyuna bağlayıcının %2’si kadar süper akışkanlaştırıcı katılmıştır.

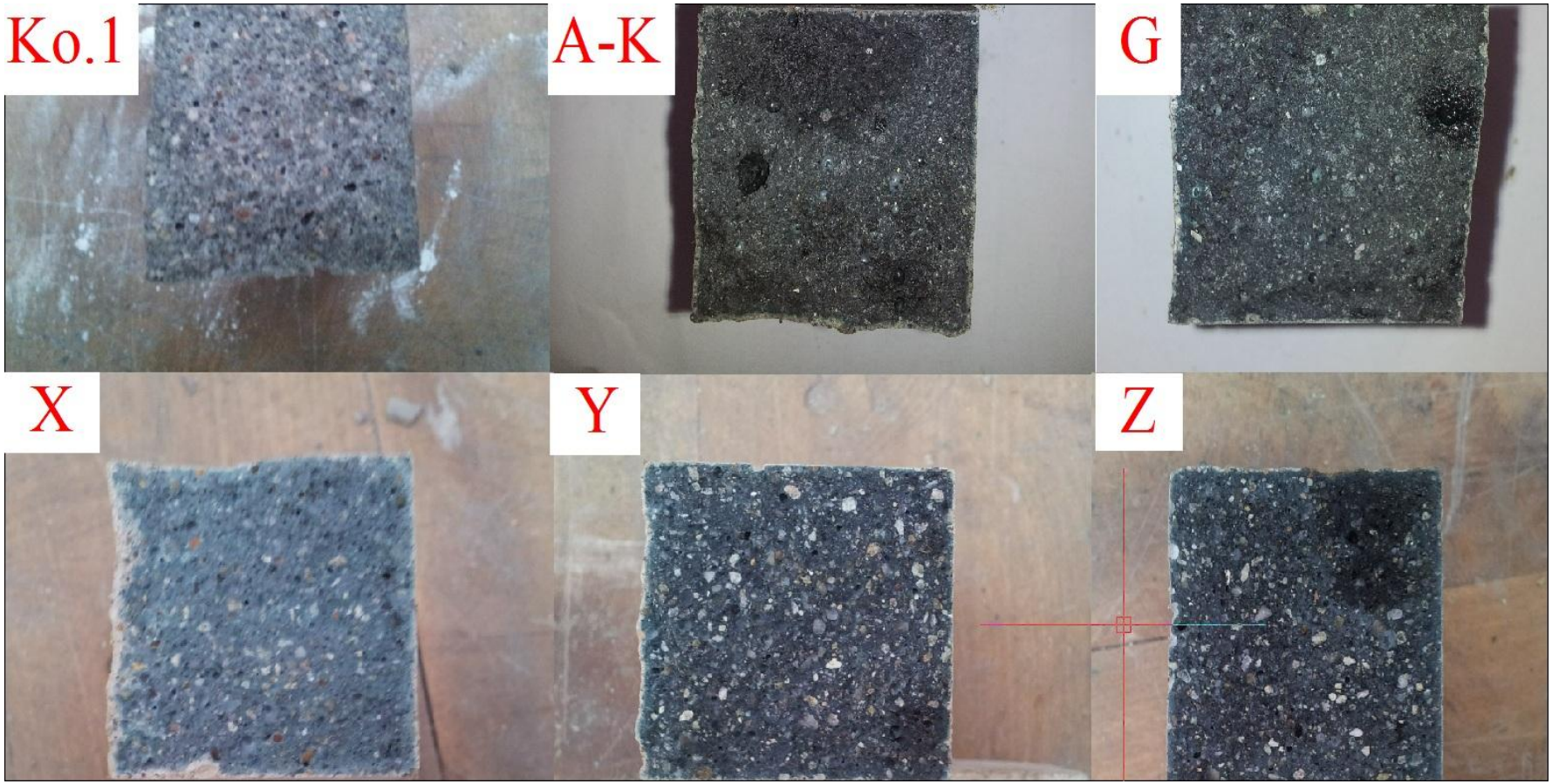
Agrega farklılığının, birim ağırlık ve yayılma tablası deneylerinin sonucuna etki etmediği saptanmıştır. Bunun yanı sıra krom cürufunun agrega olarak kullanıldığı harç tiplerinde eğilme dayanımının hayli arttığı gözlenmiştir.

Sodyum hidrosit ile aktive edilen harçların, diğer aktivatörlerin kullanıldığı harçlara oranla eğilme dayanımları daha yüksektir. Yüksek sıcaklıkta kür metodunun ise erken yaş eğilme dayanımını artırdığı gözlenmiştir. %5 oranında Na^+ konsantrasyonunda sodyum hidroksit çözeltisi ile aktive edilen harcın (“A”) eğilme dayanımı ise %2,5, %7,5 ve %10 oranında Na^+ konsantrasyonunda sodyum hidroksit çözeltisi ile hazırlanan harçlardan (sırasıyla “X”, “Y”, “Z”) daha fazladır. Eğilme dayanımları bu numuneler arasında; “A”(%5) > “X”(%2,5) > “Y”(%7,5) “Z”(%10) olarak sıralanır.

Eğilme dayanımı deneyi sırasında iki parçaya ayrılan numunelerin, kırılma kesitleri fotoğralanarak Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Aşama I'de üretilen numunelerin kesitleri.



Şekil 4.8 : Aşama II ve Aşama III'de üretilen numunelerin kesitleri.

Kür koşullarının eğilme dayanımına etkisi ise sıcaklıkla doğru orantılıdır. Numunelerin yüksek sıcaklıkta kürlenmesi ve yüksek sıcaklık kür sürelerinin artması eğilme dayanımını artırmaktadır.

Ancak daha önce de ifade edildiği gibi eğilme dayanımlarında en çok fark yaratan etken krom cürufunun agrega olarak kullanılmasıdır. Bu harçlarda gerek çimento gerek YFC kullanılsın eğilme dayanımlarında muazzam artışlar tespit edilmiştir. Şekil 4.2'de anlatılmak istenen açıkca görülebilir. Krom cürufunun agrega olarak kullanıldığı bu numunelerde yüksek sıcaklıkta kürün, benzer şekilde eğilme dayanımlarını artırdığı da söylenebilir. En yüksek eğilme dayanımını ise "G" kodlu numune göstermiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak sabit tutulan numuneler arasında ise "A-K-7-80" kodlu numune en yüksek eğilme dayanımına sahiptir. Bilindiği üzere bu tip harçlarda agrega olarak krom cürufu kullanılmış ve kalıptan çıkarıldıktan sonra ilk 7 gün 80ºC'lik kür havuzunda tutulmuştur.

Basınç dayanımlarına değinecek olursak öncelikle söylenmesi gereken, sodyum karbonat ve sodyum silikat ile aktive edilen harçların hayli düşük değerlere sahip olduğudur. Çimento+YFC sistemlerde ise sadece sodyum karbonat ile aktive edilen harçların ("E") ileri yaş dayanımlarında artış göze çarpmaktadır. Ancak bu artışa rağmen "E" numunesinin 90. gün basınç dayanımı "Kontrol I" numunesinin sadece yarısı kadardır.

Sodyum hidroksit ile aktive edilen harçlar ise özellikle 28. gün dayanımlarında "Kontrol I" numunesine yakın değerlere sahiptir. Burada yine %5 Na^+ konsantrasyonu içeren harçlar diğerlerine oranla yüksek basınç dayanımlarına sahiptir. Na^+ konsantrasyonuna göre sıralama yapılacak olursa "A"(%5) > "Y"(%7,5) "Z"(%10) > "X"(%2,5) sıralaması basınç dayanımları için doğru olacaktır.

Yüksek sıcaklıkta kür koşullarının erken yaş basınç dayanımı üzerinde ki etkisi ise hayli olumludur. Öyleki ilk 3 gün ve 7 gün 80℃'lik kür havuzunda bekleyen numunelerin ("A-3-80" ve "A-7-80") 7. gün basınç dayanımı "Kontrol I" numunesinden daha yüksektir. 60ºC'de kürlenen numunelerin ise 7. gün dayanımı 28. gün dayanımlarından fazladır. Bu doğrultu da sıcak kür koşulları ile ilgili en önemli bulgu, erken yaş dayanımları üzerinde ki olumlu etkidir.

Krom cürufunun agrega olarak kullanıldığı numunelerde ise basınç dayanımı 7. günde beklenenin altında kalsa da, 28. gün dayanımları oldukça yüksektir. Tüm

numuneler arasında 28. günde en yüksek basınç dayanımını yine krom cüruf agregalı olan "A-K-7-80" kodlu numune göstermiştir. Bu değer 60 MPa'lın biraz altındadır.

Bünyesinde hiç çimento bulunmayan harç için dikkat çekici bir değerdir.

Bilindiği üzere çalışmalarda numuneler üzerinde ultra ses dalgası hızı ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerin sonucu Şekil 4.4 ve daha ayrıntılı olarak Çizelge 4.4'de incelenebilir. En dikkat çekici bulgu, ultra ses hızının kür sıcaklığından ve Na^+ konsantrasyonundan etkilenmemesidir.

Kür koşulları ve Na^+ konsantrasyonu farklı olan sodyum hidroksit aktivatörlü numunelerin hemen hepsinden aynı hız (yaklaşık 4500m/s) ile geçmiştir. Bu karşın agrega ve alkalilerin değişmesi ile dalga hızının değiştiği söylenebilir.

Ultra ses dalga hızı en yüksek değerlerine "Kontrol I" ve "Kontrol II" numuneleri üzerinde ulaşmıştır. Bu numunelerde bilindiği gibi bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılmış ve alkali ve ya başka katkı kullanılmamıştır.

24 saat etüvde tutularak su içeriği tespit edilen numunelerde "F" kodlu harç yüksek su ihtiva etmesiyle dikkat çekmektedir. Çeşitli deneylerde kontrol numunelerine en uzak değerlere sahip olan ve mekanik özellikleri istenen seviyede olmayan "F" harcının bu durumu önceki değerlendirme de boşluklu yapısına bağlanmıştı. Su emme kapasitesi de bu görüşü güçlendirmektedir. "F" numunesinin basınç dayanımının yaşı ile ters orantılı seyri ise bu boşlukların hayli fazla olduğunu göstermektedir. Şekil 4.6 tekrar incelenirse sodyum silikat ve sodyum karbonat aktivatörlerinin kullanıldığı harçlarda su emme oranının fazla olduğu görülür. %5 - %6 oranında su emme değerleri ise ideal değerler olarak değerlendirilebilir. Bu doğrultu da "B", "C", "E" ve özellikle de "F" kodlu numunenin ağırlıkça su emme oranının hayli fazla olduğu Şekil 4.6'da ayrıntılı şekilde gözükmektedir. Söz konusu bu dört harç tipinin çalışmaların genelinde mekanik dayanımlarının diğer harç tiplerine göre düşük olduğu belirlenmiştir.

4.4 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

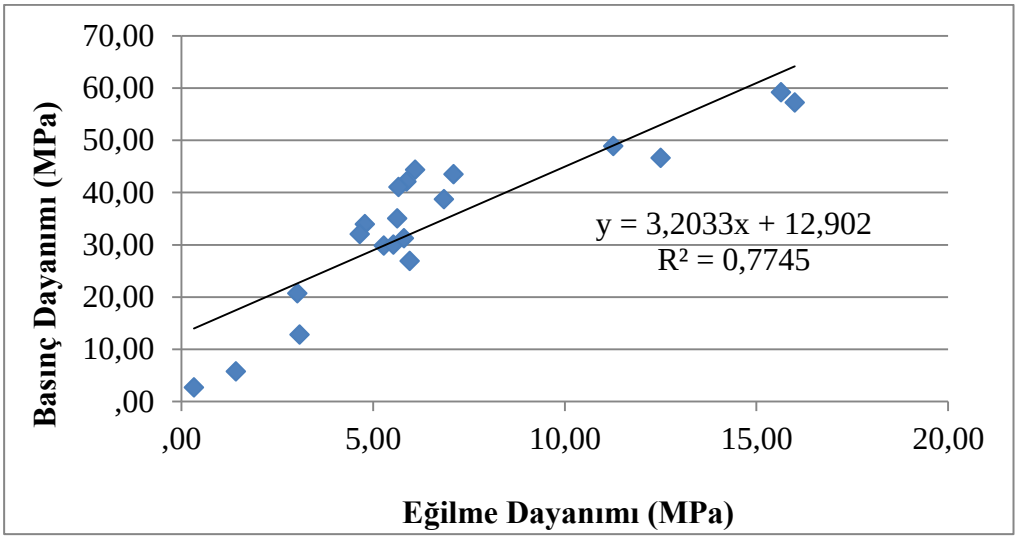
Deney sonuçları karşılaştırılarak, iki farklı deney sonucu arasında bağıntı aranacaktır. Bu karşılaştırma yapılırken numunelerin sadece 28. gün deney sonuçları kullanılacaktır.

4.4.1 Eğilme dayanımı - basınç dayanımı İlişkisi

Eğilme ve basınç dayanımları Çizelge 4.7'de, bağıntıları Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 : 28. gün eğilme ve basınç dayanımları.

Numune Kodu	28. Gün	
	Eğilme Dayanımı (MPa)	**Basınç Dayanımı (MPa)**
Kontrol I	6,1	44,4
A	5,9	42,1
B	1,4	5,7
C	3,1	12,8
D	5,3	29,8
E	3,0	20,7
F	0,3	2,7
A-3-40	5,5	30,0
A-7-40	5,8	31,3
A-3-60	5,6	35,0
A-7-60	6,8	38,7
A-3-80	5,7	41,1
A-7-80	7,1	43,5
X	6,0	26,9
Y	4,8	34,0
Z	4,7	32,0
Kontrol II	11,3	48,9
A-K	12,5	46,6
A-K-7-80	15,6	59,2
G	16,0	57,2



Şekil 4.9 : Eğilme dayanımı-basınç dayanımı grafiği.

Numunelerin 28. gün deney sonuçları incelendiğinde eğilme dayanımları (R_f) ve basınç dayanımları (R_c) arasında korelasyon katsayısı R = 0,88 olan **(4.1)** bağıntısı bulunmaktadır.

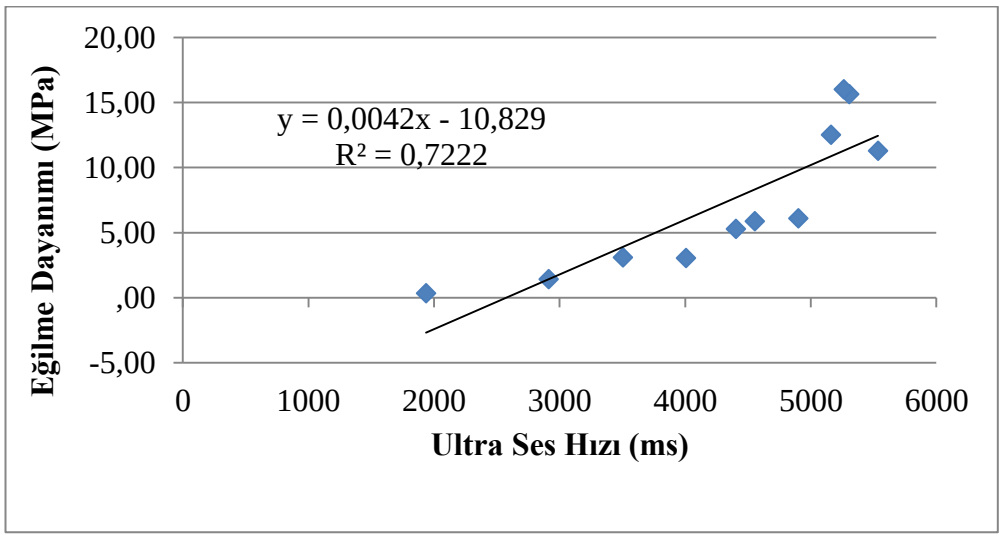
$$R_c = 3{,}2033 \cdot R_f + 12{,}902 \qquad \textbf{(4.1)}$$

4.4.2 Ultra ses hızı - eğilme dayanımı ilişkisi

Ultra ses hızı ve eğilme dayanımları Çizelge 4.8'de, bağıntıları ise Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 : 28. gün eğilme dayanımı ve ultra ses hızı değerleri.

Numune Kodu	28. Gün	
	Ultra Ses Hızı (m/s)	**Eğilme Dayanımı (MPa)**
Kontrol I	4903	6,1
A	4554	5,9
B	2914	1,4
C	3506	3,1
D	4404	5,3
E	4007	3,0
F	1937	0,3
Kontrol II	5536	11,3
A-K	5161	12,5
A-K-7-80	5307	15,6
G	5263	16,0



Şekil 4.10 : Ultra ses hızı – eğilme dayanımı grafiği.

Eğilme dayanımı (R_f), ultra ses dalgası hızı (V) arasında korelasyon katsayısı R=0,85 olan **(4.2)** bağıntısı bulunmaktadır.

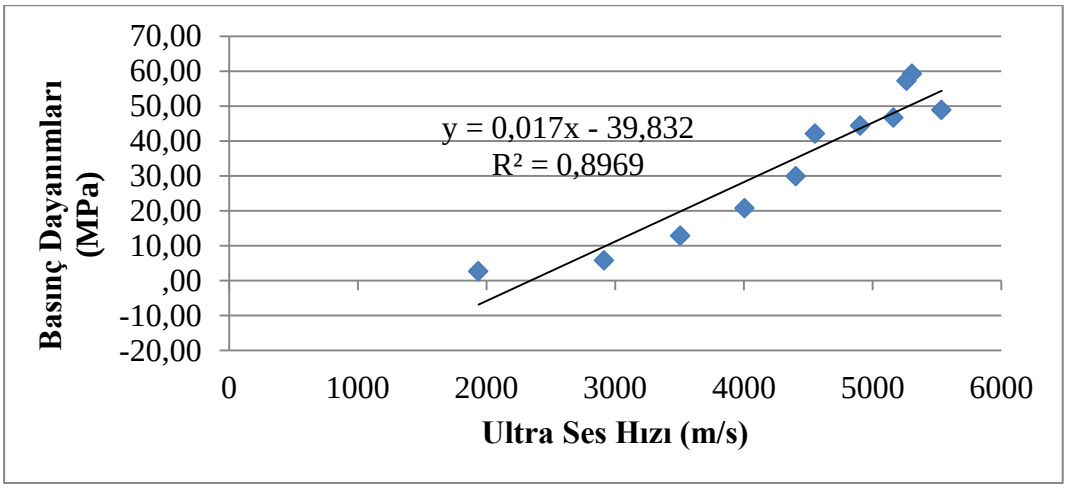
$$R_f = 0{,}0042 \cdot V - 10{,}829 \qquad \textbf{(4.2)}$$

4.4.3 Ultra ses hızı - basınç dayanımı ilişkisi

Ultra ses hızı ve basınç dayanımları Çizelge 4.9'da, bağıntıları ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 : 28. gün ultra ses hızı ve basınç dayanım değerleri.

Numune Kodu	28. Gün	
	Ultra Ses Hızı (m/s)	**Basınç Dayanımı (MPa)**
Kontrol I	4903	44,4
A	4554	42,1
B	2914	5,7
C	3506	12,8
D	4404	29,8
E	4007	20,7
F	1937	2,7
Kontrol II	5536	48,9
A-K	5161	46,6
A-K-7-80	5307	59,2
G	5263	57,2



Şekil 4.11 : Ultra ses hızı – basınç dayanımı grafiği.

Basınç dayanımı (R_c), ultra ses hızı (V) arasında korelasyon katsayısı R=0,95 olan **(4.3)** bağıntısı vardır.

$$R_c = 0{,}017 \cdot V - 39{,}832 \qquad \textbf{(4.3)}$$

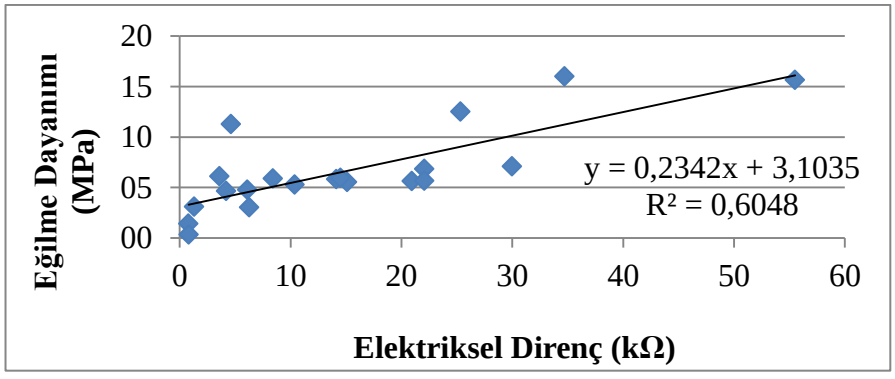
Deney sonuçları değerlendirilirken ultra ses dalgası hızının kür koşullarından ve Na^+ konsantrasyonundan bağımsız olduğu saptanmış ve bu noktaya dikkat çekilmişti. Bu doğrultuda bağıntılar elde edilirken; kür koşulları ve Na^+ içeriğiyle farklılaşan numunlerin, ultra ses hızı değerleri göz ardı edilmiştir.

4.4.4 Elektriksel direnç – eğilme dayanımı ilişkisi

Elektriksel direnç değerleri ve eğilme dayanımları Çizelge 4.10'da, bağıntıları ise Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 : 28. Gün eğilme dayanımı ve elektriksel direnç değerleri.

Numune Kodu	28. Gün	
	Özdirenç (k Ω)	Eğilme Dayanımı (MPa)
Kontrol I	3,585	6,1
A	8,405	5,9
B	0,797	1,4
C	1,305	3,1
D	10,375	5,3
E	6,280	3,0
F	0,817	0,3
A-3-40	15,112	5,5
A-7-40	14,127	5,8
A-3-60	20,934	5,6
A-7-60	22,055	6,8
A-3-80	22,062	5,7
A-7-80	29,988	7,1
X	14,496	6,0
Y	6,085	4,8
Z	4,180	4,7
Kontrol II	4,630	11,3
A-K	25,320	12,5
A-K-7-80	55,500	15,6
G	34,710	16,0



Şekil 4.12 : Elektriksel direnç – eğilme dayanımı grafiği.

Eğilme dayanımı (R_f) ile elektriksel direnç (k) arasında korelasyon katsayısı R=0,78 olan **(4.4)** bağıntısı vardır.

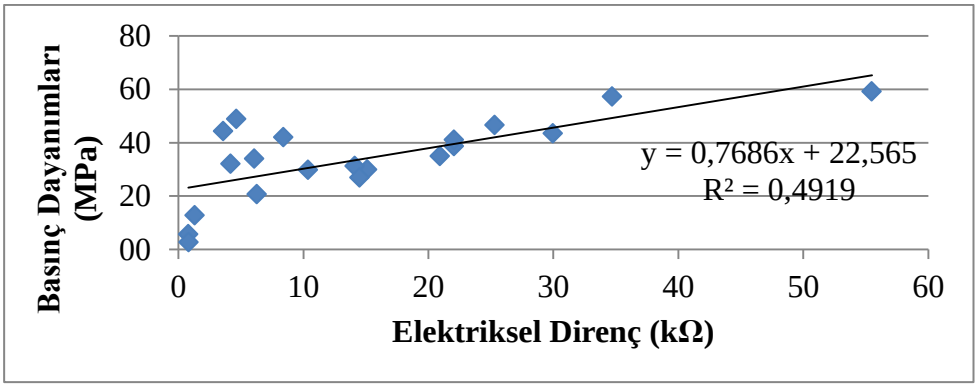
$$R_f = 0{,}2342 \cdot k + 3{,}1035 \qquad \textbf{(4.4)}$$

4.4.5 Elektriksel direnç – basınç dayanımı ilişkisi

Elektriksel direnç değerleri ve basınç dayanımları Çizelge 4.11'de, bağıntıları ise Şekil 4.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 : 28. Gün basınç dayanımı ve elektriksel direnç değerleri.

Numune Kodu	28. Gün	
	Özdirenç (k Ω)	**Basınç Dayanımı (MPa)**
Kontrol I	3,585	44,4
A	8,405	42,1
B	0,797	5,7
C	1,305	12,8
D	10,375	29,8
E	6,280	20,7
F	0,817	2,7
A-3-40	15,112	30,0
A-7-40	14,127	31,3
A-3-60	20,934	35,0
A-7-60	22,055	38,7
A-3-80	22,062	41,1
A-7-80	29,988	43,5
X	14,496	26,9
Y	6,085	34,0
Z	4,180	32,0
Kontrol II	4,630	48,9
A-K	25,320	46,6
A-K-7-80	55,500	59,2
G	34,710	57,2



Şekil 4.13 : Elektriksel direnç- eğilme dayanımı grafiği.

Basınç dayanımı (R_c) ile elektriksel direnç (k) arasında korelasyon katsayısı R=0,70 olan **(4.5)** bağıntısı vardır.

$$R_c = 0{,}7686 \cdot k + 22{,}565 \qquad \textbf{(4.5)}$$

4.5 Maliyet Analizi

Üretilen harçların maliyeti hesaplanırken, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan "2012 Yılı Yapı İşleri Birim Fiyat Listesi" kullanılmıştır. Bazı pozlar ise temin edildiği yerden alınan faturalara dayandırılarak fiyatlandırılmıştır.

"A", "D", "G", "Kontrol 1" ve "Kontrol 2" harçlarının $1m^3$'ü için maliyet hesaplanacaktır. Hesaplama yapılmadan önce Çizelge 4.1'de verilen taze harç birim ağırlıkları tekrar incelenmeli ve göz önünde bulundurulmalıdır. Hesaplanan fiyatlara; yükleme-boşaltma ve nakliye gibi giderler dahil değildir. "A", "D", "G", "Kontrol 1" ve "Kontrol 2" harçlarının maliyet analizi sırasıyla Çizelge 4.12, Çizelge 4.13, Çizelge 4.14, Çizelge 4.15, Çizelge 4.16'da gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.12 : "A" harcının maliyet analizi ($1m^3$ için).

Poz No	Rayiçler	Birim	Miktar	Fiyat (TL)	Tutar (TL)
Özel:1	Granüle YFC	ton	0,492	72	35,42
Özel:2	Sodyum Hidroksit (NaOH)	kg	44,28	4,95	219,19
Özel:3	CEN Standart Kumu	ton	1,476	250,00	369,00
4.031	Su	m^3	0,246	4,58	1,13
				TOPLAM	**624,74**

Çizelge 4.13 : "D" harcının maliyet analizi ($1m^3$ için).

Poz No	Rayiçler	Birim	Miktar	Fiyat (TL)	Tutar (TL)
04.008/2C	Portland çimentosu (Torbalı) (TS EN 197-1 CEM I 42,5 R)	ton	0,119	110,00	13,09
Özel:1	Granüle YFC	ton	0,357	72	25,70
Özel:2	Sodyum Hidroksit (NaOH)	kg	33,39	4,95	165,28
Özel:3	CEN Standart Kumu	ton	1,431	250,00	357,75
4.031	Su	m^3	0,238	4,58	1,09
				TOPLAM	**562,91**

Çizelge 4.14 : "G" harcının maliyet analizi (1m^3 için).

Poz No	Rayiçler	Birim	Miktar	Fiyat (TL)	Tutar (TL)
Özel:1	Granüle YFC	ton	0,635	72	45,72
Özel:2	Sodyum Hidroksit (NaOH)	kg	59,3	4,95	293,54
Özel:4	Krom Cürufu	ton	1,27	5	6,35
4.031	Su	m^3	0,212	4,58	0,97
04.613/1A3	Beton süper akışkanlaştırıcı yüksek mukavemet katkısı	kg	12,71	2,35	29,87
				TOPLAM	**376,44**

Çizelge 4.15 : "Kontrol 1" harcının maliyet analizi (1m^3 için).

Poz No	Rayiçler	Birim	Miktar	Fiyat (TL)	Tutar (TL)
04.008/2C	Portland çimentosu (Torbalı) (TS EN 197-1 CEM I 42,5 R)	ton	0,491	110,00	54,01
Özel:3	CEN Standart Kumu	ton	1,473	250,00	368,25
4.031	Su	m^3	0,2455	4,58	1,12
				TOPLAM	**423,38**

Çizelge 4.16 : "Kontrol 2" harcının maliyet analizi (1m^3 için).

Poz No	Rayiçler	Birim	Miktar	Fiyat (TL)	Tutar (TL)
04.008/2C	Portland çimentosu (Torbalı) (TS EN 197-1 CEM I 42,5 R)	ton	0,491	110,00	54,02
Özel:4	Krom Cürufu	ton	1,473	5	7,37
4.031	Su	m^3	0,246	4,58	1,13
				TOPLAM	**62,51**

Maliyet analizleri sonucu piyasa değerinin çok üzerinde birim fiyatlar hesaplanmıştır. Bunun en önemli nedeni CEN standart kumunun fiyatının yüksek olmasıdır. Doğal olarak en ekonomik ürün olarak, krom cürufu agregası kullanılan harçlar ön plana çıkmaktadır.

Çizelge 4.17 : Maliyet analizi yapılan harçların basınç dayanımları.

Numune Kodu	**Basınç Dayanımı (MPa)**		**Birim Fiyat (m^3)**
	7 Gün	**28 Gün**	
A	35,0	42,1	624,74 TL
D	23,4	29,8	562,91 TL
G	53,6	57,2	376,44 TL
Kontrol I	41,4	44,4	423,38 TL
Kontrol II	35,3	48,9	62,51 TL

Agrega olarak krom cürufunun kullanıldığı malzemelerin daha ekonomik olduğu sonucuna varılmıştır. Krom cürufu kullanımının daha çevreci de olacağı rahatlıkla söylenebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Yapılan deneysel çalısmalar sonucunda;

1.YFC + Çimento sistemleri; harçlar üzerinde priz hızlandırıcı ve hava sürükleyici etki yapmaktadır. Hızlı priz alan ve boşluklu yapılara sahip olan bu harçlarda eğilme ve basınç dayanımları oldukça düşük kalmıştır. Bu nedenle %100 YFC içeren harçlar üzerinde çalışmak daha doğru olacaktır.

2.Elde edilen sonuçlara göre en iyi mekanik özellikleri sodyum hidroksit alkalisi ile aktive edilen harçlar göstermiştir. Basınç ve eğilme dayanımına göre bir sıralama yapılırsa, Sodyum Hidroksit (NaOH) > Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) > Sodyum Karbonat (Na_2CO_3) şeklinde sıralanır.

3.Sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilen harçların düşük erken yaş dayanımlarını artırmak için yüksek sıcaklıkta kür uygulamanın iyi bir yöntem olduğu ortaya çıkmıştır. 80ºC sıcaklıkta ki kür havuzunda tutulan harçlar en iyi mekanik özellikleri göstermiştir.

4.Kür suyunun sıcaklığı ve bu sıcaklıkta bekleme süresi arttıkça, basınç dayanımlarında da artış gözlenmiştir.

5.Sodyum hidroksit (NaOH) alkalisi ile aktive edilen YFC sistemlerin, optimum Na^+ konsantrasyonu (YFC'ye kütlece oranı) %5 olarak belirlenmiştir. Bu oranda en yüksek basınç ve eğilme dayanımları ölçülmüştür.

6. Sodyum hidroksit NaOH aktivatörlü malzemelerde, basınç ve eğilme dayanımları göz önünde tutularak, yüzdece Na^+ konsantrasyonuna göre sıralama yapılırsa; "%5" > "%7,5" > "%10" > "%2,5" sonucu ortaya çıkar.

7.Agrega olarakta yine bir sanayi atığı olan ve oldukça ucuza temin edilebilen krom cürufu kullanılırsa, mekanik özellikleri kontrol numunelerine benzer, daha çevreci ve daha ekonomik malzemeler elde edilebilir.

8.YFC sistemlerde agrega olarak krom cürufunun kullanılmasıyla tamamen fabrika atıkları kullanılarak çevreci bir malzeme elde edilmiş ve uygun kür koşullarına tabi tutularak çalışmalarda gözlenen en yüksek basınç ve eğilme mukavemetine erişilmiştir.

9.Çalışmalarda eğilme ve basınç mukavemeti arasında "$R_c = 3{,}2033 \cdot R_f + 12{,}902$" (R=0,88) bağıntısı bulunmuştur.

10.Numuneler üzerinde ultra ses dalgası hızları ölçülerek; basınç mukavemeti ile ses dalga hızı arasında "$R_c = 0{,}017 \cdot V - 39{,}832$" (R=0,95) ve eğilme mukavemeti ile ses dalga hızı arasında "$R_f = 0{,}0042 \cdot V - 10{,}829$" (R=0,85) bağıntıları bulunmuştur.

11.Numunelerin elektriksel direnci ile basınç mukavemeti arasında ki bağıntı "$R_f = 0{,}2342 \cdot k + 3{,}1035$" (R=0,78) ve yine elektriksel direnç ve eğilme dayanımı arasında ki bağıntı "$R_c = 0{,}7686 \cdot k + 22{,}565$" (R=0,70) olarak belirlenmiştir.

12.Üretilen harçların birim fiyatları hesaplanmış ve en ucuz harç olarak "Kontrol II" göze çarpmıştır. Agrega olarak krom cürufu içeren bu tip harçların çevreci ve ekonomik olduğu rahatça söylenebilir.

13.Birim fiyatı, sadece "Kontrol II" tipi harçlardan fazla olan "G" kodlu harçların içeriğinde YFC ve krom cürufu olduğu bilinmektedir. Ekonomik değer olarak ikinci sırada olan "G" kodlu harcının en çevreci malzeme olduğu rahatlıkla söylenebilir.

14.Çalışmalarda yüksek dayanımlı, ekonomik ve çevreci harçlar üretilebileceği açıkca ortaya konmuştur.

5.2 Öneriler

1.Alkaliler ile aktive edilmiş cüruflu karışımlar üzerinde daha kapsamlı araştırmalar yapılmalı, kimyasal aktivatörlerin kullanımına ilişkin maliyet-verim profili çıkartılarak, en uygun aktivatör dozajına karar verilmelidir.

2.Yüksek fırın cürufu içeren betonlar, kür şartlarına karşı daha hassas olduğu için bu konuda dikkatli olunmalı, uzun süreli ve etkili küre tabi tutulmalıdır.

3.Farklı alkalileri birarada kullanarak YFC sistemleri üzerinde çalışılabilir. İki ve ya daha fazla alkalin aktivatör ile harç üretilerek daha kapsamlı bir çalışma yapılabilir.

4.Daha düşük su/bağlayıcı oranlarının kullanılması durumunda, gereksinim duyulacak akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların alkaliler ile aktive edilmiş cüruflu karışımların özellikleri üzerindeki etkilerine ve elde edilecek dayanımlara yönelik daha kapsamli bir çalışma yapılabilir.

5.Bir sanayi atığı olan granüle yüksek fırın cüruflarının öğütülerek beton yapımında bağlayıcı olarak kullanılmasının, çevresel faydaları olduğundan, cürufun bu tarz kullanımına yönelik tanıtıcı ve bilgilendirici uygulamalar desteklenerek, pratik alanda kullanılması teşvik edilmeli ve ülke kaynaklarının maksimum verimle değerlendirilmesine çalışılmalıdır.

6.“Yeşil bina” (çevreci yapı tasarımı) yapımında YFC’yi yüksek oranda kullanmaya teşvik eden şartnameler olduğu bilinmektedir. Aynı şekilde krom cürufunun agrega olarak kullanılması teşvik edilerek daha çevreci yapılar yapılabilir.

7.Krom cürufunun agrega olarak kullanıldığı harçlarda durabilite testlerinin ön planda olduğu bir çalışma yapılarak, bu malzemenin özellikleri için veri artışı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

ACI 308-92, (1994). Standard Practice for Curing Concrete. *ACI Manual of Concrete Practice, Part 2.*

Al-Kaisi, A. F. (1989). Early Age Strength and Creep of Slag Cement Concretes PhD Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Leeds.

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

Arslan, M. (2001). Beton (Dökümü, kalıpları, kusurları, dayanıklılıgı), *Atlas Yayın Dagıtım Ltd. Sti., İstanbul,* 23.

ASTM C 125 (1994). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. *Annual Book of ASTM Standards.*

ASTM C 311 (1994). Standard Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use a Mineral Admixtural Portland-Cement Concrete. *Annual Book of ASTM Standards.*

ASTM C 595 (1993). Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. *AnnualBook of ASTM Standards.*

ASTM C 618 (1994). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. *Annual Book of ASTM Standards.*

ASTM C 989 (1994). Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars. *Annual Book of ASTM Standards.*

ASTM C 1073 (1991). Test Method for Hydraulic Activity of Ground Slag byReaction with Alkali. *Annual Book of ASTM Standards.*

Babu, K. D., Kumar, V. S. R. (2000). Efficiency of Ground Granulated Blast Furnace Slag in Concrete. *Cement and Concrete Research, Vol. 30,* 1031–1036.

Bakharev, T., Sanjanyan, J.G. and Cheng, Y.B. (1999). Alkali Activation of Australian Slag Cements. *Cement and Concrete Research, Vol. 29,* 113–120.

Bakharev, T., Sanjanyan, J.G. and Cheng, Y.B. (2000). Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research, 30-9,* 1367-1374.

Bakharev, T., Sanjanyan, J.G. and Cheng, Y.B. (2001). Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation, *Cement and Concrete Research, 31,* 1277-1283.

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

Bakharev, T., Sanjanyan, J.G. and Cheng, Y.B. (2002). Sulfate attack on alkali activated slag concrete, *Cement and Concrete Research, 32,* 211-216.

Bakharev, T., Sanjanyan, J.G. and Cheng, Y.B. (2003). Resistance of Alkali Activated Slag Concrete to Acid Attack. *Cement and Concrete Research, Vol. 33,* pp. 1607–1611.

Baradan, B. (2000). Yapı Malzemesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.*

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. (2002). Betonarme Yapılarda Kalıcılık. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir,* 282.

Barnett, S. J., Soutsos, M. N., Millard, S. G., Bungey, J. H. (2006). Strength Development of Mortars Containing Ground Granulated Blast-Furnace Slag: Effect of Curing Temperature and Determination Apparent Activation Energies. *Cement and Concrete Research, Vol. 36,* 434–440.

Bilim, C. (2006). Yüksek Fırın Cüruf Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği. *Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.*

Brough, A.R. and Atkinson, A. (2000). Automated identification of the aggregate-paste interfacial transition zone in mortars of silica sand with portland or alkaliactivated slag cement paste, *Cement and Concrete Research, 30,* 849-854.

Buchwald, A. and Schulz, M. (2005). Alkali-activated binders by use of ındustrial byproducts, *Cement and Concrete Research, 35-5,* 968-973.

Collins, F., Sanjayan, J. G. (1998). Early Age Strength and Workability of Slag Pastes Activated by NaOH and Na2CO3. *Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 5,* 655–664.

Collins, F., Sanjayan, J. G. (1999). Workability and Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Research, Vol. 29,* 455–458.

Collins, F., Sanjayan, J. G. (1999). Effects of Ultra-Fine Materials on Workability and Strength of Concrete Containing Alkali-Activated Slag as The Binder. *Cement and Concrete Research, Vol. 29,* pp. 459–462.

Collins, F., Sanjayan, J. G. (1999). Strength and Shrinkage Properties of Alkali-Activated Slag Concrete Conctaining Porous Coarse Aggregate. *Cement and Concrete Research, Vol. 29,* 607–610.

Collins, F., Sanjayan, J. G. (2000). Effect of Pore Size Distribution on Drying Shrinkage of Alkali-Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Research, Vol. 30,* pp. 1401–1406.

Collins, F., Sanjayan, J. G. (2001). Mikrocracking and Strength Development of Alkali Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Composites, Vol. 23,* 345–352.

Çetin Kurt, Jürgen Bittner (2005). "Sodium Hydroxide", Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Weinheim: Wiley-VCH.

Çevik, M. (1993). Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Külden Taşıyıcı Hafif Agrega Üretimi. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara*, 235–242.

Çopuroglu, O. (2006). Frost salt scaling of cement-based materials with a high slag content, PhD Thesis. *Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Deft University of Technology, Netherlands,* 188.

Canbaz, M. (2007). Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cüruflu Harçların Özellikleri. *Doktora Tezi,Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.*

Doğulu, S. (1998). Effect of Fineness of Ground Granulated Blast-Furnace Slags on Their Cementitious Properties. *Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.*

Erdoğan, T. Y. (1993). Atık Maddelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara,* 1–8.

Erdoğan, T. Y. (1995). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara,* 113.

Erdoğan, T. Y. (1997). Admixtures for Concrete. *Middle East Technical University, The Middle East Technical University Press, ISBN 975-429-113-6, 188s, Ankara.*

Erdoğan, T. Y. (2002). Materials of Construction. *Middle East Technical University, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., ISBN 975-7064-48-3, 308s, Ankara*.

Erdoğan, T. Y. (2003). Beton. *ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş. Ankara, 196.*

Escalante-García, J.I., Gorokhovsky, A.V., Mendoza, G. and Fuentes, A.F. (2003). Effect of geothermal waste on strength and microstructure of alkali-activated slag cement mortars, *Cement and Concrete Research, 33-10,* 1567-1574.

Gollop, R.S. and Taylor, H.F.W. (1996). Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. v. comparison of different slag blends, *Cement and Concrete Research, 26-7,* 1029-1044.

Glukhovsky, V. D., Rostovkaya, G. S. and Rumyna, G. V. (1980). High strength slag-alkali cement. *7th International Congress on the Chemistry of Cements, Paris, France, III,* 164–168.

Güner, A. (1993). Günümüzde Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründe Kullanımı. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara*, 215–222.

Holloway, M. and Sykes, J.M. (2005). Studies of the corrosion of mild steel in alkaliactivated slag cement mortars with sodium chloride admixtures by a galvanostatic pulse method, *Corrosion Science, 47-12,* 3097-3110.

Jimenez, A. F., Palomo, J. G., Puertas, F. (1999). Alkali-Activated SlagMortars Mechanical Strength Behaviour. *Cement and Concrete Research,Vol. 29,* 1313–1321.

Jimenez, A.F. and Puertas, F. (1997). Alkali-activated slag cements: kinetic studies, Cement and Concrete Research, 27, 359-368.

Jimenez, A.F. and Puertas, F. (2001). Setting of Alkali-Activated Slag Cement. Influence of Activator Nature. *Advances in Cement Research, Vol. 13, No. 3,* 115–121.

Jimenez, A.F. and Puertas, F. (2002). Alkali silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate, *Cement and Concrete Research, 32,* 1019-1024.

Krizan, D., Zivanovic, B. (2002). Effects of Dosage and Modulus of Water Glass on Early Hydration of Alkali-Slag Cements. *Cement and Concrete Research, Vol. 32,* 1181–1188.

Kutti, T., Berntsson, L., Chandra, S. (1992). Shrinkage of Cements with High Content of Blast-Furnace Slag. Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, *Supplementary Papers, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., İstanbul,* 615–625.

Kocataskın, F. (1987). Yeni gelisen beton malzemeleri, *İleri Beton Teknolojisi Ders Notları, İTÜ İnsaat Fakültesi, İstanbul,* 119.

Kostick, D. S. (1994). Soda Ash, Industrial Minerals and Rocks, *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, Colorado.*

Lecomte, I., Henrist, C., Liégeois, M., Maseri, F., Rulmont, A. and Cloots, R. (2006). (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and portland cement, *Journal of the European Ceramic Society, 26-16,* 3789-3797.

Li, G., Zhao, X. (2003). Properties of Concrete Incorporating Fly Ash and Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Cement and Concrete Composites, Vol. 25,* 293–299.

Neville, A. M. (1981). Properties of Concrete, *Longman Scientific & Technical, England.*

Newman, J., Choo, B. S. (2003). Advanced Concrete Technology. *Constituent Materials, Butterworth-Heinemann, Oxford.*

Pu, X., Gan, C., Wu, L. and Chen, J. (1988), A study on new structural material advanced alkali-slag (JK) concrete. Silicate Construction Products, 6–11.

Regourd, M. (1980). Structure and Behavior of Slag Portland Cement Hydrates. *Proceedings, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Editions Septima, Paris, Vol. 1,* 10–18.

Regourd, M. (1986). Slags and Slag Cements. Cement Replacement Materials, R.N. Swamy, Surrey University Pres, 73–79.

Roy, D. M., Idorn, G. M. (1982). Hydration, Structure and Blast Furnace Slag Cements, Mortars and Concrete. *ACI Journal, Proceedings, Vol. 79, No. 6,* 445–457.

Odler, R., Skalny, J. and Brunauer, S. (1976). Properties of the System "clinkerlignosulfonate- carbonate". *6th International Congress on the Chemistry of Cement held in Moscow in 1974 (Moscow: Stroyizdat Publisher), Vol. 2, Book 2,* 30–32.

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

Palacios, M., Puertas, F. (2005). Effect of Superplasticizer and Shrinkage-Reducing Admixtures on Alkali-Activated Slag Pastes and Mortars. *Cement and Concrete Research, Vol. 35,* 1358–1367.

Shi, C., Day, R. L. (1995)**.** A Calorimetric Study of Early Hydration of Alkali-Slag Cements. *Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 6,* 1333–1346.

Shi, C., Day, R. L. (1996). Some Factors Affecting Early Hydration of Alkali-Slag Cements. *Cement and Concrete Research, Vol. 26,* 439–447.

Shi, C., Day, R. L. (1999). Early Strength Development and Hydration of Alkali-Activated Blast Furnace Slag/Fly Ash Blends. *Advances in Cement Research,Vol. 11, No. 4,* 189–196.

Shi, C., Krivenko, P. V., Roy, D., 2006. Alkali-Activated Cements and Concretes. *Taylor & Francis London,* 6-22.

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

Tokyay, M. (2003). Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar. *Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlerdirmesi Raporu, TÇMB, Ankara,* 47.

Tokyay, M. ve Erdogdu, K. (2003). Cüruflar ve cüruflu çimentolar, Arastırmaların Gözden Geçirilmesi Raporu, TÇMB Yayını, Ankara, 48.

Topçu, _.B. ve Canbaz, M. (2006). Aktive edilmis yüksek fırın cüruflu harçlara alkali türünün etkisi, *Yapı Mekanigi Semineri 2006, ODTÜ-ESOGÜ-ETB, Eskisehir,* 120-128.

TS 20 (1992). Çimento-Yüksek Fırın Cüruflu Çimentolar. *Türk Standartları Enstitüsü,Ankara.*

TS EN 196-1 (2009). Çimento Deney Metotları, Bölüm:1 Dayanım Tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*

TS EN 196-3 (2000). Çimento Deney Metodları-Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*

TS EN 197-1 (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.

TS EN 1008 (2003). Beton - Karma Suyu - Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su da Dahil Olmak Üzere Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*.

TS EN 1015-3 (2000). Kagir Harcı Deney Metodları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile). *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*

TS EN 12350-5 (2010). Beton – Taze Beton Deneyleri, Bölüm:5 Yayılma Tablası Deneyi. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*

TS EN 12390-2 (2010). Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri, Bölüm:2 Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*

TS EN 12390-3 (2010). Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri, Bölüm:3 Deney Numunelerinin Basınç Dayanım Tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*

Türkmen, İ. (2003). Influence of Different Curing Conditions on the Physical and Mechanical Properties of Concretes with Admixtures of Silica Fume and Blast Furnace Slag. *Materials Letters, Vol. 57, No. 29,* 4560–4569.

Wainwright, P. J., Ait-Aider, H. (1995). The Influence of Cement Source and Slag Additions on the Bleeding of Concrete. *Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7,* 1445–1456.

Wang, S. D., Pu, X. C. (1992). The Role of Different Anions and Cations of Alkali Component in The Process of Hydration of Alkali-Slag Blend. Proceedings, *CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Papers, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., İstanbul,* 803–810.

Wang, S. D., Scrivener, K. L., Pratt, P. L. (1994). Factors Affecting The Strength of Alkali Activated Slag. *Cement and Concrete Research, Vol. 24,* 1033–1043.

Wang, S. D., Pu, X. C., SCcrivener, K. L., Pratt, P. L. (1995). Alkali Activated Slag Cement and Concrete: A Review of Properties and Problems. *Advances in Cement Research, Vol. 7, No. 27,* 93–102.

Wu. X., Yan, S., Sheng, X. and Tang, M. (1991). Alkali-activated cement based radioactive waste forms. *Cement and Concrete Research*, 21, 16.

Yuan, R., Gao, Q. and Ouyang, S. (1987). Study on structure and latent hydraulic activity of slag and its activation mechanism. *Journal of Wuhan University of Technology (in Chinese), P.R. China, 3,* 297–303.

Zhou, H., Wu, X., Xu, Z., Tang, M. (1993). Kinetic Study on Hydration of Alkali-Activated Slag. *Cement and Concrete Research, Vol. 23, pp. 1253–1258.* Zivica, V., 2007, Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures, C*onstruction and Building Materials,* 35.

Zivica, V. (1993). Alkali-silicate admixture for cement composites incorporating pozzolan or blast furnace slag. *Cement and Concrete Research, 23(5),* 1215–1222.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Caner Elibol

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara, 1985

Adres: 19 Mayıs Mah., Operatör Raif Bey Sok., 28/28

E-Posta: caner.elibol@gmail.com

Lisans: İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

2010 Kasım'ından beri Enye İnşaat firmasında proje mühendisi olarak çalışmaktayım. Yürütmekte olduğumuz projelerde yol-köprü tasarımı ve köprü statik-dinamik hesaplarının hazırlanmasında görev almaktayım.

80116 Sicil numarası ile kayıtlı olduğum TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası tarafından Yapı, Ulaştırma ve Geoteknik alanlarında uzmanlıklarım tescillenmiştir.