

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Cahit BİLİM

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KATKISININ ÇİMENTO TABANLI
MALZEMELERDE KULLANILABİLİRLİĞİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2006

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KATKISININ ÇİMENTO TABANLI
MALZEMELERDE KULLANILABİLİRLİĞİ**

Cahit BİLİM

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Bu tez / / 2006 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği /
Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.**

**İmza
Doç. Dr. Cengiz D. ATİŞ
DANIŞMAN**

**İmza
Doç. Dr. Alaettin KILIÇ
ÜYE**

**İmza
Doç.Dr.İsmail H. ÇAĞATAY
ÜYE**

**İmza
Yrd. Doç. Dr. A. Hamza TANRIKULU
ÜYE**

**İmza
Yrd. Doç. Dr. Umur Korkut SEVİM
ÜYE**

**Bu tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:**

**Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür**

**Bu Çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: MMF 2004 D16**

**Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların
kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.**

ÖZ

DOKTORA TEZİ

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KATKISININ ÇİMENTO TABANLI MALZEMELERDE KULLANILABİLİRLİĞİ

Cahit BİLİM

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Doç. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

Yıl : 2006, **Sayfa:** 206

Jüri : Doç. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

Doç. Dr. Alaettin KILIÇ

Doç. Dr. İsmail H. ÇAĞATAY

Yrd. Doç. Dr. A. Hamza TANRIKULU

Yrd. Doç. Dr. Umur Korkut SEVİM

Bu çalışmada, OYSA İskenderun Çimento Fabrikası'ndan temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun harç ve beton özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Değişen su/bağlayıcı ve cüruf oranlarıyla hazırlanan harç ve betonların özellikleri, sadece normal Portland çimentosu ile üretilen kontrol harç ve beton karışımları ile karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, üç farklı Na^+ dozajında hazırlanmış, sodyum silikat çözeltisi, NaOH ve Na_2CO_3 kullanılarak aktive edilen cüruf katkılı harçların dayanım ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Yürütülen deneylerin sonucundan, düşük su/bağlayıcı oranlarına sahip betonlarda yapılan cüruf ikamesinin kontrol betonlarına kıyasla basınç mukavemetinde artış sağladığı, %40 ve %60 cüruf ilavesinin harç numunelerin basınç, eğilme ve aşınma dayanımlarını arttırarak, boşluk oranı ve kapiler su emme katsayılarında şahit numuneye göre önemli oranlarda düşüşler meydana getirdiği gözlenmiştir. Alkaliler ile aktive edilmiş cürufli harçlarda ise en yüksek mekanik dayanımlar sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş harçlardan elde edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, alkaliler ile aktive edilmiş cürufli karışımların, normal Portland çimentolarına göre oldukça yüksek kuruma rötresine sahip olduğu ve cüruf katkılı harç ve betonların, kuru kür şartlarından kontrol betonlarına göre daha fazla etkilendiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Fırın Cürufları, Harç, Beton, Basınç Dayanımı, Alkalilerle Aktive Edilmiş Cüruf

ABSTRACT

Ph. D THESIS

THE USE OF GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG IN CEMENT BASED MATERIALS

Cahit BİLİM

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF ÇUKUROVA

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

Year : 2006, **Pages:** 206

Jury : Assoc. Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ
Assoc. Prof. Dr. Alaettin KILIÇ
Assoc. Prof. Dr. İsmail H. ÇAĞATAY
Assist. Prof. Dr. A. Hamza TANRIKULU
Assist. Prof. Dr. Umur Korkut SEVİM

In this research, influence of the use of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS), which is provided from OYSA İskenderun Cement Plant, on mortar and concrete properties was investigated. Measured properties of slag mortar and concrete prepared using different amount of slag and water/binder ratio were compared with the control mortars and concretes made with Normal Portland Cement (NPC) only. Nevertheless the strength and durability properties of alkali activated slag (AAS) mortars were investigated by using sodium silicate solution, sodium hydroxide and sodium carbonate as activator. Three levels of Na^+ concentration in mixtures, 4%, 6%, and 8%, were studied. The test results showed that the slag replacement made in concretes having low water/binder ratio increased the compressive strength compared to control mixtures and also that 40% and 60% replacement of slag with cement result an increment in compressive and tensile strength, resistance to abrasion and, it reduced porosity and capillary water absorption coefficient compared to control mortar made with NPC only. Sodium silicate solution was the most effective activator in AAS mortars. The results obtained also showed that drying shrinkage in AAS mixtures was very high compared with NPC and at the same time slag mortar and concrete cured in dry environment was influenced more than that of NPC concrete.

Keywords: Blast Furnace Slags, Mortar, Concrete, Compressive Strength, Alkali Activated Slag

TEŞEKKÜR

Doktora tez programımın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön vererek yardım ve bilgi konusunda bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, sayın Doç. Dr. Cengiz Duran ATİŞ'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma kapsamındaki deneysel çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan başta Arş. Gör. Okan KARAHAN olmak üzere, tüm mesai arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarımda kullanılan hiper akışkanlaştırıcının elde edilmesindeki katkılarından dolayı YKS firması yetkililerine, sodyum silikat çözeltisinin temininde yardımcı olan Şişecam Soda Sanayi'ne, çimentonun temininde ve cürufun kimyasal analizlerinin yapılmasındaki katkılarından dolayı Adana Çimento Sanayi'ne ve Hakan ÖZBEBEK'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyerek bana her zaman destek olan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

SAYFA NO

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Puzolanlar	4
1.1.1. Puzolanik Reaksiyon	5
1.1.2. Puzolanik Aktivlik	5
1.1.3. Puzolanların Kullanım Amacı	6
1.2. Yüksek Fırın Cürufları	7
1.2.1. Giriş	7
1.2.2. Yüksek Fırın Cüruflarının Üretimi	8
1.2.3. Yüksek Fırın Cüruflarının İnceliği	11
1.2.4. Yüksek Fırın Cüruflarının Kimyasal Kompozisyonu	12
1.2.5. Yüksek Fırın Cüruflarının Yapısı	13
1.2.6. Yüksek Fırın Cüruflarının Hidratasyonu	14
1.2.7. Yüksek Fırın Cüruflarının Bağlayıcı Özelliklerini Etkileyen Faktörler	17
1.2.8. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cüruflarının Betonun Özellikleri Üzerine Etkileri	17
1.2.8.1. Taze Beton Özellikleri Üzerine Etkisi	18
1.2.8.1.(1). Su İhtiyacı ve İşlenebilirlik	18
1.2.8.1.(2). Kanama - Kusma	18
1.2.8.1.(3). Hidratasyon Isısı	18
1.2.8.1.(4). Priz Zamanı	19
1.2.8.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri Üzerine Etkisi	19

1.2.8.2.(1). Basınç Mukavemeti ve Mukavemet Gelişimi	19
1.2.8.2.(2). Çekme Mukavemeti.....	20
1.2.8.2.(3). Sünme	20
1.2.8.2.(4). Rötire	20
1.2.8.2.(5). Elastisite Modülü.....	20
1.2.8.3. Dayanıklılık Özellikleri	21
1.2.8.3.(1). Permeabilite	21
1.2.8.3.(2). Sülfata Dayanıklılık.....	21
1.2.8.3.(3). Donma - Çözülme Dayanıklılığı	22
1.2.8.3.(4). Aşınma Dayanıklılığı.....	22
1.2.8.3.(5). Alkali - Silika Reaksiyonu.....	22
1.2.8.3.(6). Klor Geçirgenliği.....	23
1.2.8.3.(7). Karbonatlaşma	24
1.2.9. Kürün Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonlar Üzerindeki Etkisi	24
1.2.10. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Bağlayıcı Özellikli Malzeme Olarak Kullanılmaya Uygunluğu	25
1.2.11. Yüksek Fırın Cüruflarının İnşaat Sektöründe Kullanım Alanları.....	27
1.2.11.1. Hafif Beton Agregası Olarak Kullanımı	27
1.2.11.2. Yol Malzemesi ve Asfalt Betonu Agregası Olarak Kullanımı.....	27
1.2.11.3. Katkılı Çimento ve Beton Üretiminde Kullanımı	27
1.2.11.3.(1). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Cürufu Çimento Üretiminde Kullanımı	28
1.2.11.3.(2). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Yapımında Mineral Katkı Olarak Kullanımı	28
1.2.12. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cüruflarının Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğine Dair Standartların Belirttiği Değerler	29
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	32
2.1. Giriş.....	32

2.2. Kaynak Ön Araştırması	33
2.2.1. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Taze Beton ve Harç Özellikleri	
Üzerindeki Etkileri	34
2.2.1.1. Su İhtiyacı ve İşlenebilirlik	34
2.2.1.2. Kanama	35
2.2.1.3. Priz Süresi	36
2.2.1.4. Hidratasyon Isısı	36
2.2.2. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Sertleşmiş Beton ve Harç	
Özellikleri Üzerindeki Etkileri	38
2.2.2.1. Mukavemet Gelişimi	38
2.2.2.2. Elastisite Modülü ve Sünme	41
2.2.2.3. Isıl Genleşme	41
2.2.2.4. Rötire	43
2.2.3. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Betonun Durabilitesi	
Üzerindeki Etkileri	44
2.2.3.1. Sülfat Etkisine Dayanıklılık	44
2.2.3.2. Klor Etkisine Dayanıklılık	46
2.2.3.3. Deniz Suyu Etkisine Dayanıklılık	48
2.2.3.4. Karbonatlaşmaya Dayanıklılık	49
2.2.3.5. Aşınmaya Dayanıklılık	52
2.2.3.6. Donma - Çözülme Direnci	53
2.2.3.7. Asit Etkisine Dayanıklılık	54
2.2.3.8. Alkali - Agregat Reaksiyonu	55
2.2.3.9. Kılcal Su Emme	56
2.2.3.10. Boşluk Yapısı	57
2.2.4. Kürün Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonlar Üzerindeki Etkisi	61
2.2.5. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufalarının Beton	
Teknolojisinde Kullanılması	63
3. MATERYAL VE METOD	72
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	72
3.1.1. Çimento	72

3.1.2. Yüksek Fırın Cürufu	73
3.1.3. Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı	73
3.1.4. Su	74
3.1.5. Aktivatörler	74
3.1.6. Agregalar	75
3.1.6.1. Beton Üretiminde Kullanılan Agregalar	75
3.1.6.2. Harç Üretiminde Kullanılan İnce Agregalar	76
3.2. Cüruf Aktivite İndeksi	78
3.3. Beton Karışım Oranları	78
3.4. Harç Karışım Oranları	80
3.4.1. Yüksek Fırın Cürufu Harçlar İçin Karışım Oranları	80
3.4.2. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufu Harçlar İçin Karışım Oranları	81
3.5. Deneysel Çalışmalar	82
3.5.1. Beton Numuneler Üzerinde Yürütülen Çalışmalar	82
3.5.2. Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Çalışmalar	82
3.5.3. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufu Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Çalışmalar	84
3.5. Notasyonlar	85
4. DENEY SONUÇLARI BULGULAR VE TARTIŞMA	86
4.1. Beton Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneyler ve Sonuçları	86
4.1.1. Sarsma Tablası ve Birim Ağırlık Değerleri	86
4.1.2. Beton Basınç Mukavemetleri	89
4.1.2.1. 350 kg/m ³ Çimento Dozlu Beton Numunelerin Basınç Mukavemetleri	90
4.1.2.1.(1). 350 Dozlu Beton Basınç Mukavemetlerinin Şahit Numune Basınç Mukavemeti ile Kıyaslanması	93
4.1.2.1.(2). 350 Dozlu Betonların 28 Günlük Şahit Numune Dayanımlarına Göre Bağlı Dayanımları	95
4.1.2.2. 400 kg/m ³ Çimento Dozlu Beton Numunelerin Basınç	

Mukavemetleri	96
4.1.2.2.(1). 400 Dozlu Beton Basınç Mukavemetlerinin Şahit Numune Basınç Mukavemeti ile Kıyaslanması	99
4.1.2.2.(2). 400 Dozlu Betonların 28 Günlük Şahit Numune Dayanımlarına Göre Bağlı Dayanımları	101
4.1.2.3. 450 kg/m ³ Çimento Dozlu Beton Numunelerin Basınç Mukavemetleri	102
4.1.2.3.(1). 450 Dozlu Beton Basınç Mukavemetlerinin Şahit Numune Basınç Mukavemeti ile Kıyaslanması	105
4.1.2.3.(2). 450 Dozlu Betonların 28 Günlük Şahit Numune Dayanımlarına Göre Bağlı Dayanımları	107
4.1.2.4. Kür Şartlarının Beton Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi	108
4.2. Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneyler ve Sonuçları.....	114
4.2.1. Yayılma Tablası Deneyleri	114
4.2.2. Harç Numune Basınç Mukavemetleri.....	116
4.2.2.1. Harç Numunelerin 28 Günlük Şahit Numune Dayanımlarına Göre Bağlı Dayanımları.....	122
4.2.2.2. Kür Şartlarının Harç Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi	124
4.2.3. Harç Numune Eğilme Mukavemetleri	126
4.2.3.1. Eğilme Dayanımlarının 28 Günlük Şahit Numune Dayanımı ile Kıyaslanması.....	130
4.2.3.2. Kür Şartlarının Eğilme Mukavemeti Üzerindeki Etkisi.....	131
4.2.3.3. Eğilme Mukavemeti ile Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişki	132
4.2.4. Harç Numune Aşınma Mukavemeti	134

4.2.4.1. Kür Şartlarının Aşınma Mukavemeti Üzerindeki Etkisi.....	137
4.2.4.2. Aşınma Mukavemeti ile Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişki.....	138
4.2.4.3. Aşınma Mukavemeti ile Eğilme Mukavemeti Arasındaki İlişki.....	140
4.2.5. Harç Numunelerin Karbonatlaşma Değerleri.....	141
4.2.6. Harç Numunelerin Su Emme ve Boşluk Oranları.....	145
4.2.6.1. Boşluk Oranı ile Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişki	151
4.2.7. Harç Numunelerin Kapiler Su Emme Katsayıları.....	153
4.2.8. Harç Numunelerin Rötire Değerleri.....	156
4.3. Harç Numune Basınç Mukavemetleri ile Beton Numune Basınç Mukavemetlerinin Karşılaştırılması.....	158
4.4. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufllu Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneyler ve Sonuçları.....	161
4.4.1. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufllu Harç Numunelerin Basınç Dayanımları	164
4.4.2. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufllu Harç Numunelerin Eğilmede Çekme Dayanımları	174
4.4.3. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufllu Harç Numunelerin Karbonatlaşma Değerleri	178
4.4.4. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufllu Harç Numunelerin Rötire Değerleri	180
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	184
5.1. Yapılan Çalışmalar Sonucunda Elde Edilen Bulgular	184
5.1.1. Beton Karışımlar Üzerinde Saptanan Bulgular.....	184
5.1.2. Harç Karışımlar Üzerinde Saptanan Bulgular.....	185
5.1.3. Alkaliler ile Aktive Edilmiş Cürufllu Harç Karışımları Üzerinde Saptanan Bulgular.....	188
5.2. Öneriler.....	189
KAYNAKLAR	191
ÖZGEÇMİŞ.....	206

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA NO

Çizelge 1.1. Yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonu.....	12
Çizelge 1.2. ASTM C 989'a göre beton katkı maddesi olarak kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri.....	30
Çizelge 2.1. Deniz suyuna batırılmış harç numunelerinde bir yıl sonra meydana gelen boy uzamaları	48
Çizelge 3.1. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi	72
Çizelge 3.2. Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri.....	73
Çizelge 3.3. Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu (%).....	73
Çizelge 3.4. Sodyum hidroksitin kimyasal kompozisyonu (%).....	74
Çizelge 3.5. Sodyum karbonatın kimyasal kompozisyonu (%).....	75
Çizelge 3.6. Karışık agrega granülometrisi ve TS 706 standart sınırları	76
Çizelge 3.7. Harç numunelerde kullanılan kuma ait fiziksel özellikler	77
Çizelge 3.8. Harç numunelerde kullanılan kuma ait elek analizi sonuçları	77
Çizelge 3.9. Bir metreküp beton karışımı için gerekli yaklaşık malzeme miktarları	79
Çizelge 4.1. Taze betonların sarsma tablası yayılma değerleri, kullanılan akışkan dozajları ve çökme değerleri	88
Çizelge 4.2. Taze betonların birim ağırlık değerleri (kg/dm ³).....	89
Çizelge 4.3. Islak kür edilmiş 350 kg/m ³ çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti değerleri (MPa).....	91
Çizelge 4.4. 350 dozlu ıslak kür edilmiş cürufllu beton basınç mukavemetlerinin şahit beton basınç mukavemetine oranı (%).....	93
Çizelge 4.5. 350 dozlu betonların 28 günlük şahit numune dayanımlarına göre bağlı dayanımları (%)	96
Çizelge 4.6. Islak kür edilmiş 400 kg/m ³ çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti değerleri (MPa).....	97
Çizelge 4.7. Islak kür edilmiş 400 dozlu beton basınç mukavemetlerinin aynı gündeki kendi şahitlerine oranı (%).....	99
Çizelge 4.8. 400 dozlu betonların 28 günlük şahit numune dayanımlarına	

göre bağıl dayanımları (%)	101
Çizelge 4.9. Islak kür edilmiş 450 kg/m ³ çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti değerleri (MPa).....	102
Çizelge 4.10. Islak kür edilmiş 450 dozlu beton basınç mukavemetlerinin aynı gündeki kendi şahitlerine oranı (%)	105
Çizelge 4.11. 450 dozlu betonların 28 günlük şahit numune dayanımlarına göre bağıl dayanımları (%)	107
Çizelge 4.12. Kuru kür edilen betonların 28 ve 90 günlük basınç dayanımları (MPa)	109
Çizelge 4.13. 28 gün ıslak ve kuru kür edilen betonların basınç dayanımları (MPa)	110
Çizelge 4.14. 90 gün ıslak ve kuru kür edilen betonların basınç dayanımları (MPa)	110
Çizelge 4.15. 28 ve 90 gün için farklı kür edilen betonların basınç mukavemetleri oranı	111
Çizelge 4.16. Harç karışımlarının ortalama yayılma değerleri (cm) ve kullanılan akışkan miktarları (%).....	115
Çizelge 4.17. 0.30 S/B oranındaki harçların basınç mukavemeti (MPa).....	116
Çizelge 4.18. 0.40 S/B oranındaki harçların basınç mukavemeti (MPa).....	117
Çizelge 4.19. 0.50 S/B oranındaki harçların basınç mukavemeti (MPa).....	119
Çizelge 4.20. Islak kür edilen harçların 28 günlük şahit numune dayanımlarına göre bağıl dayanımları (%)	122
Çizelge 4.21. Kuru kür edilen harçların 28 günlük şahit numune dayanımlarına göre bağıl dayanımları (%)	123
Çizelge 4.22. Kuru kür edilen harçların basınç mukavemetlerinin ıslak kür edilen harçların basınç mukavemetlerine oranı (%)	124
Çizelge 4.23. 0.30 S/B oranındaki harçların eğilmede çekme mukavemeti (MPa) .	126
Çizelge 4.24. 0.40 S/B oranındaki harçların eğilmede çekme mukavemeti (MPa) .	127
Çizelge 4.25. 0.50 S/B oranındaki harçların eğilmede çekme mukavemeti (MPa) .	129
Çizelge 4.26. Islak kür edilen harçların eğilme mukavemetlerinin 28 günlük şahit numune eğilme mukavemetine oranı (%)	130

Çizelge 4.27. Kuru kür edilen harçların eğilme mukavemetlerinin 28 günlük şahit numune eğilme mukavemetine oranı (%)	131
Çizelge 4.28. Kuru kür edilen harçların eğilme mukavemetlerinin ıslak kür edilen harçların eğilme mukavemetlerine oranı (%)	131
Çizelge 4.29. Islak kür edilen harçların aşınma oranları (%).....	134
Çizelge 4.30. Kuru kür edilen harçların aşınma oranları (%)	136
Çizelge 4.31. Kür şartlarının aşınmaya etkisi (%)	137
Çizelge 4.32. Kuru kür edilen harçlara ait karbonatlaşma derinlikleri (mm)	143
Çizelge 4.33. Islak kür edilen harçların ağırlıkça su emme oranları (%).....	146
Çizelge 4.34. Kuru kür edilen harçların ağırlıkça su emme oranları (%)	146
Çizelge 4.35. Islak kür edilen harçların boşluk oranları (%)	149
Çizelge 4.36. Kuru kür edilen harçların boşluk oranları (%).....	149
Çizelge 4.37. Harçlara ait 28 günlük kapiler su emme katsayıları ($\text{cm/sn}^{1/2}$).....	154
Çizelge 4.38. Farklı Na dozajlarına sahip alkaliler ile aktive edilmiş değişik ikame oranlarındaki cürufllu harçların basınç dayanımları (MPa)	164
Çizelge 4.39. Alkalilerle aktive edilmiş cürufllu harçların basınç dayanımları (MPa)	166
Çizelge 4.40. Farklı Na dozajlarına sahip alkaliler ile aktive edilmiş değişik ikame oranlarındaki cürufllu harçların eğilme dayanımları (MPa)	174
Çizelge 4.41. Alkalilerle aktive edilmiş cürufllu harçların eğilme dayanımları (MPa)	176
Çizelge 4.42. Alkali aktive edilmiş cürufllu harçların karbonatlaşma değerleri (mm)	178
Çizelge 4.43. Uluslararası kimya birliğine göre boşluk büyüklüğü sınıflaması	182

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA NO

Şekil 1.1. Yüksek fırın şeması	9
Şekil 1.2. Granülasyon yönteminin şematik gösterimi	10
Şekil 1.3. Peletleme yönteminin şematik gösterimi	11
Şekil 1.4. CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ üçlü diyagramında cürufun yeri	13
Şekil 1.5. Cürufun camsı yapısının şematik açıklaması	14
Şekil 3.1. Beton karışımlarda kullanılan agreganın granülometri eğrisi	76
Şekil 3.2. Harç numunelerde kullanılan kuma ait elek analizi grafiği	77
Şekil 4.1. Taze betonların yayılma değerlerini ölçmek için kullanılan sarsma tablası	87
Şekil 4.2. Islak kür edilmiş 350 kg/m ³ çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi	92
Şekil 4.3. Islak kür edilmiş 400 kg/m ³ çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi	98
Şekil 4.4. Islak kür edilmiş 450 kg/m ³ çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti	104
Şekil 4.5. Kuru ve ıslak kür şartlarında elde edilen betonların basınç mukavemeti ilişkisi	112
Şekil 4.6. 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi	117
Şekil 4.7. 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi	119
Şekil 4.8. 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi	121
Şekil 4.9. Kür şartlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi	125
Şekil 4.10. 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için eğilmede çekme mukavemeti-ikame oranı ilişkisi	127
Şekil 4.11. 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için eğilmede çekme mukavemeti-ikame oranı ilişkisi	128
Şekil 4.12. 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için eğilmede çekme	

mukavemeti-ikame oranı ilişkisi.....	129
Şekil 4.13. Kür şartlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi.....	132
Şekil 4.14a. Islak ve kuru kür edilmiş numunelerin basınç mukavemeti ile eğilme çekme mukavemeti arasındaki ilişki	133
Şekil 4.14b. Her iki kür durumundaki numunelerin basınç mukavemeti ile eğilme çekme mukavemeti arasındaki ilişki.....	133
Şekil 4.15. Islak kür edilmiş harçlara ait aşınma oranı-zaman ilişkisi.....	135
Şekil 4.16. Kuru kür edilmiş harçlara ait aşınma oranı-zaman ilişkisi	136
Şekil 4.17a. İki ayrı kür durumu için aşınma % ağırlık kaybı-basınç dayanımı ilişkisi	139
Şekil 4.17b. Her iki kür durumu için aşınma % ağırlık kaybı-basınç dayanımı ilişkisi.....	139
Şekil 4.18a. İki ayrı kür durumu için aşınma % ağırlık kaybı-eğilme çekme mukavemeti ilişkisi	140
Şekil 4.18b. Her iki kür durumu için aşınma % ağırlık kaybı-eğilme çekme mukavemeti ilişkisi.....	141
Şekil 4.19. Karbonatlaşma yapmış harç numuneleri.....	142
Şekil 4.20. Belirli zaman dilimlerinde harç numuneler için elde edilen karbonatlaşma miktarı-cüruf ikame oranı ilişkisi.....	144
Şekil 4.21. Su/bağlayıcı oranının cüruf içeren ve içermeyen harçların 28 günlük karbonatlaşma derinliği üzerine etkisi.....	145
Şekil 4.22. Islak kür edilmiş harçlara ait su emme oranı-zaman ilişkisi.....	147
Şekil 4.23. Kuru kür edilmiş harçlara ait su emme oranı-zaman ilişkisi	148
Şekil 4.24. Islak kür edilmiş harçlara ait boşluk oranı-zaman ilişkisi	150
Şekil 4.25. Kuru kür edilmiş harçlara ait boşluk oranı-zaman ilişkisi.....	151
Şekil 4.26a. İki ayrı kür durumu için boşluk oranı-basınç mukavemeti ilişkisi	152
Şekil 4.26b. Her iki kür durumu için boşluk oranı-basınç mukavemeti ilişkisi.....	152
Şekil 4.27a. Su emme oranı-kapiler su emme katsayısı ilişkisi.....	155
Şekil 4.27b. Boşluk oranı-kapiler su emme katsayısı ilişkisi.....	156
Şekil 4.28. 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip harçların rötre-zaman ilişkisi.....	157
Şekil 4.29. 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip harçların rötre-zaman ilişkisi.....	157

Şekil 4.30. 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip harçların rötre-zaman ilişkisi.....	158
Şekil 4.31. Dozaja göre harç ile beton numune basınç mukavemetleri ilişkisi.....	159
Şekil 4.32. Farklı kür şartlarına maruz bırakılmış harç numune ile beton numune basınç mukavemetleri ilişkisi.....	160
Şekil 4.33. Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu harçların 28 günlük basınç Dayanımları	167
Şekil 4.34a. %4 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruflu harçların basınç dayanımları	168
Şekil 4.34b. %6 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruflu harçların basınç dayanımları	168
Şekil 4.34c. %8 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruflu harçların basınç dayanımları	169
Şekil 4.35. NaOH ve Na ₂ CO ₃ ile aktive edilmiş harçların basınç dayanımları	170
Şekil 4.36. Üç farklı aktivatör ile aktive edilmiş cüruflu harçların basınç dayanımları	171
Şekil 4.37a. %4 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruflu harçların basınç dayanımları üzerine silikat modülünün etkisi.....	172
Şekil 4.37b. %6 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruflu harçların basınç dayanımları üzerine silikat modülünün etkisi.....	172
Şekil 4.37c. %8 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruflu harçların basınç dayanımları üzerine silikat modülünün etkisi.....	173
Şekil 4.38. Üç farklı aktivatör ile aktive edilmiş cüruflu harçların eğilme dayanımları	177
Şekil 4.39. %65 bağıl nemli ortamda kür edilen normal Portland çimentolu harcın ve farklı alkali aktivatörler ile aktive edilmiş cüruflu harçların karbonatlaşma derinlikleri	180
Şekil 4.40. Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu harç numunelere ait rötre-zaman ilişkisi.....	181

SİMGELER VE KISALTMALAR

E.K.	: Erimez kalıntı
K.K.	: Kızdırma kaybı
f_{ck}	: Karakteristik beton mukavemeti
D_s	: Deney sonucundaki ϕ
D_i	: Deney öncesindeki ϕ
Q	: Absorbe edilen su miktarı
A	: Suyla temas halinde olan yüzeyin alanı
t	: Zaman
k	: Kapilarite (kılcallık) katsayısı
R^+	: Alkali

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 katkıları kullanılarak değiştirilip iyileştirilebilmektedir. İşte bu amaçla, gerek kimyasal katkıları gerekse de puzolanik özelliklere sahip birçok doğal ve yapay malzeme, çok eski zamanlardan günümüze değin yapımcı 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 durumdaki 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 oluşturdıklarından, “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 kullanılabilir. Kontrollü miktarda su ya da basınçlı buhar ile soğutulan geliştirilmiş yüksek fırın cüruflarında da, soğutulma işlemi yeterince hızlı olmadığından, kristal yapı hakimdir ve hidrolik bağlayıcılık özellikleri bulunmamaktadır. Geliştirilmiş cürufların kırılmasıyla hafif agrega elde edilebilmekte ve bunlar hafif beton yapımında kullanılabilir. 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. Cürufu çimento üretiminde, Portland çimentosu klinkeri ve küçük miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülerek,
3. Beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak kullanılabilir.

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 cürufu çimento elde edilmesi, oldukça eskiye dayanan bir uygulamadır. İlk cürufu çimentolar, Almanya’da 1892’de, ABD’de 1896’da üretilmeye başlanmıştır. Halen, Türkiye’de ve birçok ülkede cürufu 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, cürufu 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).

Puzolanlar genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Birinci gruptaki puzolanlar doğal olarak ortaya çıkan malzemeler olup elde edilişleri genellikle kırma, öğütme ve eleme ile sınırlıdır (Soroka, 1993). Volkanik camlar, volkanik tüfler, diatomlu topraklar, traslar ve bazı killeri 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. Pozolanik Reaksiyon

Ana bileşenleri silis olan pozolanların 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, pozolanların ince öğütülmüş formda olması gerekmektedir (Newman ve Choo, 2003). Pozolan ve Portland çimentosu karışımı hidratasyona girince pozolanik reaksiyon etkisiyle bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Buna göre belli bir sürenin sonunda, pozolan içeren betonların çimento hamurunda Portland çimentosunun hamuruna oranla daha az serbest kireç ve daha çok kalsiyum silika hidrat (C-S-H) ürünü bulunmaktadır. Pozolan 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, pozolanın silisi ile kalsiyum hidroksit arasında meydana gelen reaksiyon basitçe $CH+S+H \rightarrow C-S-H$ (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 pozolan 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. Pozolanik Aktivite

Bir beton karışımındaki pozolanın hidrate olmuş kireçle arasındaki reaksiyonun ne kadar iyi olduğu pozolanik aktivite ile tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle pozolanik aktivite, kalsiyum hidroksitle, alümina silikatlar arasında oluşan ve sonucunda bağlayıcı özelliği olan hidratasyon ürünü meydana getiren reaksiyona işaret etmektedir (Erdoğan, 2002). Bir pozolanın Portland çimentosu betonu içinde kullanılabilmesi için değeri test ile ölçülebilen ve yeteri derecede pozolanik aktiviteye sahip olması gerekir. Pozolanik 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 karışımındaki su miktarı ise kontrol karışımının gösterdiği akmaı sağlayabilecek su miktarı olarak alınır.

Hazırlanan numuneler, dayanımları bulunmadan önce, kirece doymuş su içinde deney gününe kadar kür edilir. Kür sıcaklığı $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 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 aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{Dayanım aktiflik indisi} = (A/B) \cdot 100 \quad (1.1)$$

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 ısını 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. Giriş

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.

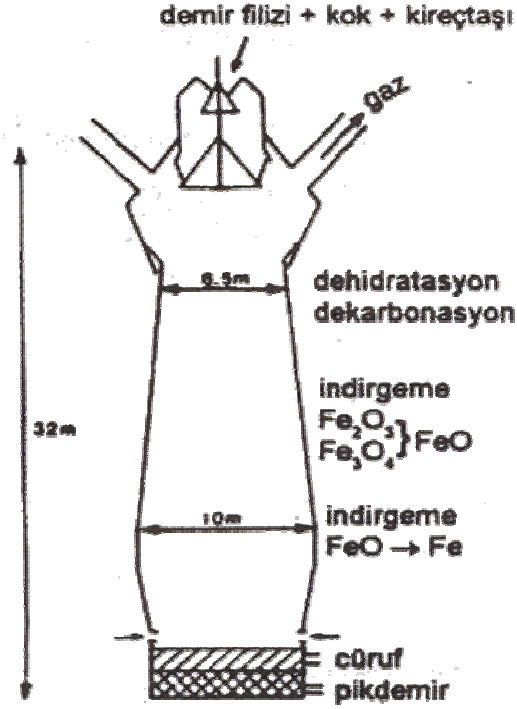
1.2.2. Yüksek Fırın Cüruflarının Üretimi

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 ($\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 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, Şekil 1.1’de de gösterilen ve 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

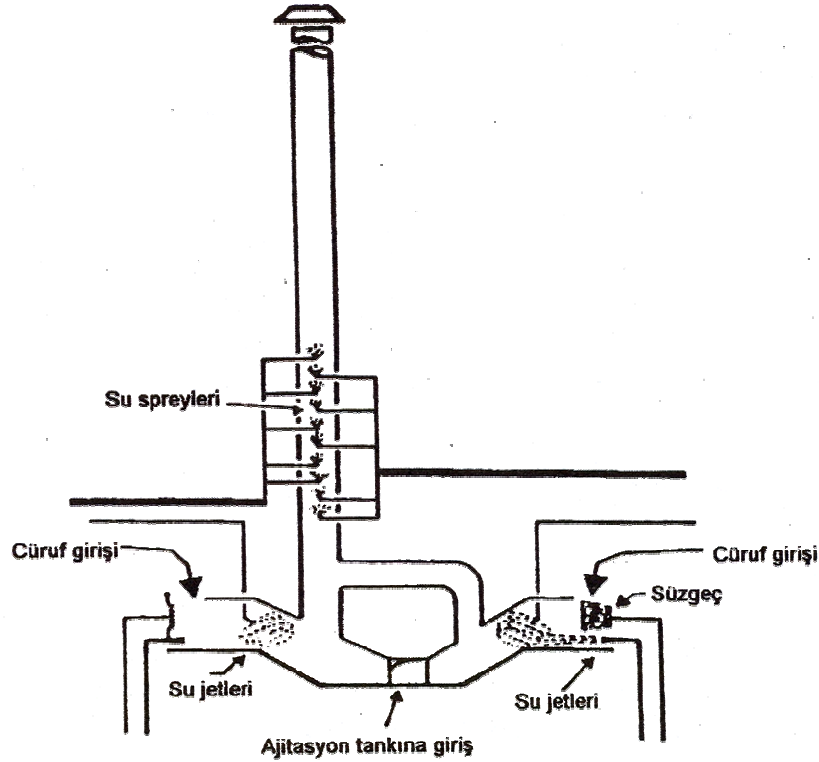
birlikte, kireç, kok kömürünün külü, silis, alümin, karbon, mangan, fosfor ve sülfür gibi yabancı maddelerden oluşan ve “cüruf” adı verilen malzeme topluluğunu bırakır. Yoğunluk farkından dolayı, demir ve cüruf ayrı çıkışlarla dışarı alınmaktadır.



Şekil 1.1. Yüksek fırın şeması (Tokyay, 2003)

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 yapılu bu cüruflar, kırılarak agrega haline getirildiğinde, hidrolik bağlayıcılık özellikleri bulunmadığından, ancak yol dolgu malzemesi ya da beton agregası olarak kullanılabilir.

Granülasyon yönteminde, camsı yapıdaki granüle yüksek fırın cürufun elde edilebilmesi, eskiden, basit olarak, eriyik cürufun su içerisine aniden daldırılması ile mümkün olmaktadır. Ancak, Şekil 1.2’de de verilen en modern granülasyon yöntemlerinde ise, erimiş haldeki cüruf yüksek basınçlı su fışkıyelerinin içinden geçmeye zorlanır. Bu da, cürufun hızlı bir şekilde en büyük tane büyüklüğü yaklaşık 5 mm olan camsı granüllere dönüşüp soğumasına neden olur. Buradaki su sıcaklığı yaklaşık olarak 50°C’nin altında olup soğutma işlemi çok miktarda suyun püskürtülmesi (kütlece suyun cürufa oranı 10) ile yapılmaktadır. İşlem sonucunda cürufun içerdiği su miktarı yaklaşık olarak %30 civarındadır.

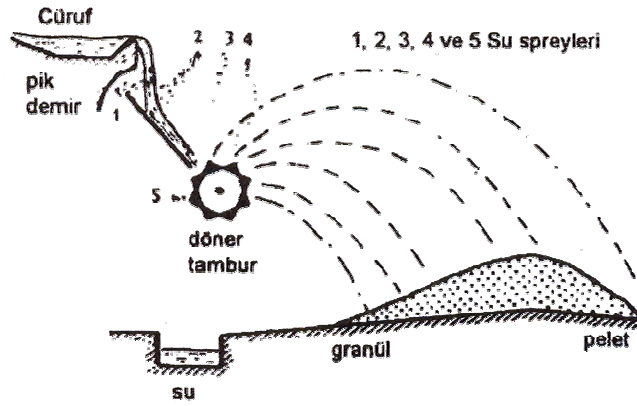


Şekil 1.2. Granülasyon yönteminin şematik gösterimi (Tokyay, 2003)

Şekil 1.3’te verilen peletleme yönteminde ise, eriyik cüruf bir vibrasyon plakası üzerine dökülmekte ve bu işlemle genişleyen cüruf, bir miktar su püskürtülerek soğutulmaktadır. Buradan da yaklaşık 1 m çapında ve yüzgeç gibi çıkıntılara sahip dönen bir tambura aktarılan cüruf, bu tambur vasıtasıyla havaya fırlatılmakta ve havada, çok çabuk soğutulma nedeniyle, granülasyon elde edilmektedir. Bu

yöntemde kullanılan su miktarı, 1 ton cüruf için yaklaşık 1 m³'tür. İşlem sonunda cüruf içinde kalan su miktarı ise %10'un altındadır.

Granülasyon metodu, yüksek camsı yapıya sahip cüruf üretiminde en etkili yöntemdir. Ancak, maliyetinin peletleme yönteminden 6 kat daha fazla olması, bu yöntemin kullanımını sınırlandırmaktadır (Newman ve Choo, 2003; Regourd, 1986).



Şekil 1.3. Peletleme yönteminin şematik gösterimi (Tokyay, 2003)

Ani olarak suya daldırma, basınçlı su püskürtülmesi veya peletleme yöntemleriyle granüle duruma getirilen cürufların içinde bulunan su, kurutucu değirmenler ya da filtreli havuzlar yardımıyla süzülmemekte ve cüruflar, bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için de geleneksel çimento öğütme değirmenlerinde çimento inceliğine kadar öğütülmektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları, sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörlerle bir araya getirildiğinde ya da Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan Ca(OH)_2 ile birleştirildiğinde hidrolik özelliğe sahip olur. Bu özellikleri nedeniyle, öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarını, cürufli çimentoların üretiminde veya beton yapımında mineral katkı maddesi olarak kullanmak mümkün olmaktadır.

1.2.3. Yüksek Fırın Cüruflarının İnceliği

Granüle yüksek fırın cüruflarının hidrolik bağlayıcılığı, ne kadar ince öğütülürse o kadar iyi olacağından, Portland çimentosundan daha ince olacak şekilde en az 400 m²/kg inceliğe kadar öğütülmelidir. (Newman ve Choo, 2003).

1.2.4. Yüksek Fırın Cüruflarının Kimyasal Kompozisyonu

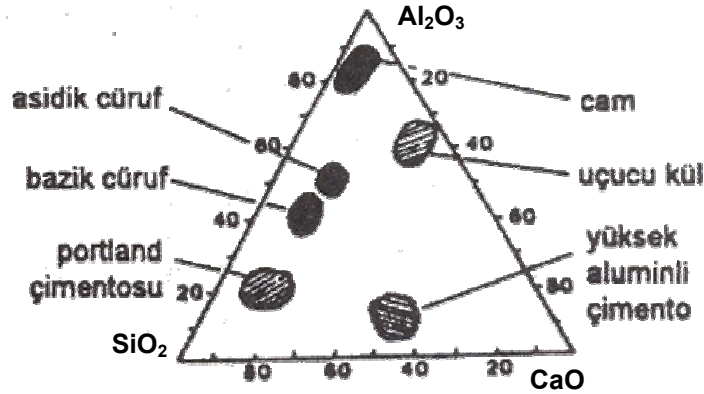
Yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonu yüksek fırının şartlarına ve ham maddelerin kaynağına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Newman ve Choo, 2003). Kimyasal yapılarında başta kireç, silika ve alümin olmak üzere az miktarlarda da demir, magnezyum ve kükürt bulunmaktadır. Değişik ülkelerde 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 ₂ O ₃	7–18	9–16	15–18	13–19	3–8
Fe ₂ O ₃	0.1–1.5	-	0–0.7	0.3–2.5	0.5–6.0
MgO	0–19	8–21	1–3	3.5–7	0.1–4.0
MnO	0.2–1.5	-	0.3–1.5	1–2.5	-
S	0–2.0	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/SiO₂ oranının artmasıyla artar. Ancak bu sınır aşıldığında, yani CaO miktarının çok yüksek olması durumunda granülasyon güçleşeceğinden hidrolik özellikte bir azalma ortaya çıkar. Sabit CaO/SiO₂ oranında, Al₂O₃ miktarının artması ise cüruf aktivitesini artırır. 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).

Cürufun kimyasal kompozisyonu üçlü bir diyagramda (CaO-SiO₂-Al₂O₃), diğer bazı malzemelerle birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 1.4’te gösterilmiştir.

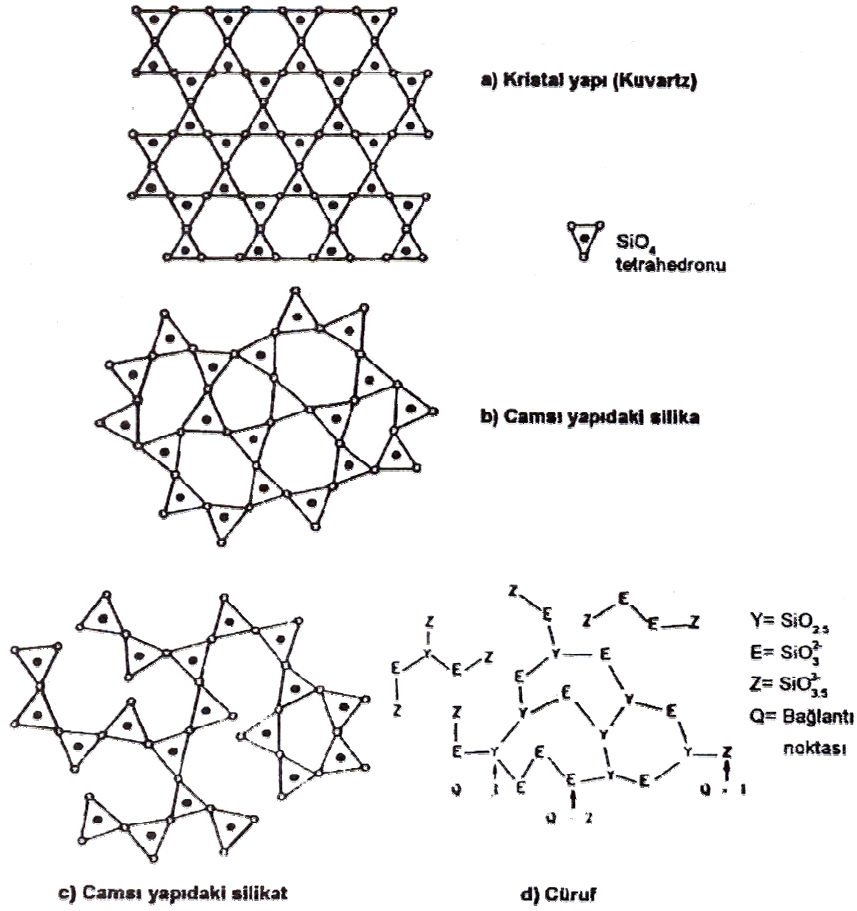


Şekil 1.4. CaO-SiO₂-Al₂O₃ üçlü diyagramında cürufun yeri (Tokyay, 2003)

1.2.5. Yüksek Fırın Cüruflarının Yapısı

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

Yüksek fırın cürufunun camı yapısını önce kristal yapıdaki silika olan kuartzın yapısından yola çıkarak açıklamak mümkündür. Şekil 1.5a'da kuartzın SiO₄ tetrahedronlarından oluşan düzgün kristal yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Bu yapıyı oluşturan tetrahedronların her köşesi birer başka tetrahedronla ortaktır. Camı silikada, yukarıda belirtilen yapı, tetrahedronların düzgün ve birbirini düzenli olarak tekrarlayan şekilde dizilmesi, Şekil 1.5b'de de görüldüğü gibi bazı Si-O-Si bağlarının kırılması ve araya bazı metal katyonlarının girmesi nedeniyle bozulmuştur. Şekil 1.5c'de, kristal yapıdaki her tetrahedronun dört köşede birer tetrahedrona komşu olması durumu camı silikat yapısında 1-4 komşu tetrahedron bulunması haline dönüşmüştür. Artık, üç boyutlu bir kafes yapıdan söz etmek mümkün değildir. Son olarak Şekil 1.5d'de görülen camı cüruf yapısında ise bazı Si konumları diğer atomlar tarafından işgal edilmiştir. Örneğin, Si⁺⁴ yerine Al⁺³ gelmesi, bir SiO₂'nin AlO₂ 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 1.5. 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 hidratasyonu ile 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 çökmesi olarak tanımlanabilir. Cüruf hidratasyonunun başlangıç aşamasında, silikat iyonları eriyiğe geçer, daha sonra, ilk C-S-H çökmesinin ardından, eriyiğin kireç konsantrasyonu artar ve son olarak da alümina konsantrasyonunda, hidrate alüminat kristallerinin oluşumuna kadar, artış görülür. Yüksek fırın cürufu hamurlarındaki hidrate fazların belirlenmesine yönelik

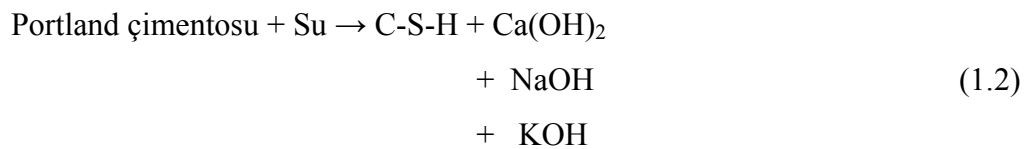
bir araştırmada $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ dörtlü sisteminde C-S-H, C_2ASH ve $\text{C}_4\text{AH}_{13-19}$ bileşenlerinin oluştuğu belirlenmiştir (Tokyay, 2003).

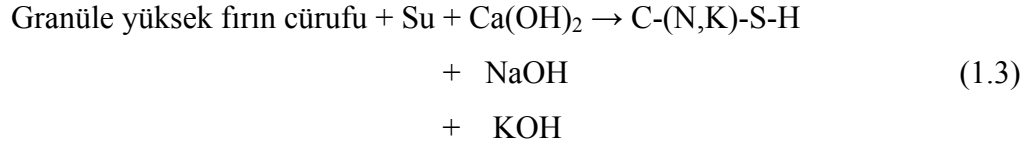
Granüle yüksek fırın cüruflarının kendi başlarına suyla yaptıkları reaksiyon, Portland çimentolarının hidratasyonu ile karşılaştırıldığında, oldukça yavaş geliştiğinden, araştırmacılar, ağır seyreden bu hidratasyon hızını yükseltebilmek için bu reaksiyonları hızlandıracak çalışmalara yönelmiştir (Tokyay, 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 cürufllu 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 cürufllu 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 : (1) Alkaliler (soda, kireç, sodyum karbonat, sodyum silikat, vb) ve (2) 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.

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 meydana 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 çözünübilirliği de artmakta ve reaksiyonlar daha erken yer alabilmektedir (Erdoğan, 1995). Çimento, su ve cüruf arasındaki reaksiyonları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür:





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

Cürufun ayrıca öğütülerek betonda mineral katkı olarak kullanılmasının beton özelliklerine yararları şu şekilde sıralanmaktadır (Erdoğan, 1995):

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 geçirimsiliğe sahiptir.
5. Yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklıdır.

1.2.8.1. Taze Beton Özellikleri Üzerine Etkisi

1.2.8.1.(1). Su İhtiyacı ve İşlenebilirlik

Yüksek fırın cürufu 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.

1.2.8.1.(2). 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.

1.2.8.1.(3). Hidratasyon Isısı

Cürufların beton içerisinde kullanılması, hidratasyon ısını 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.

1.2.8.1.(4). 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

1.2.8.2.(1). 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, cürufllu 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, cürufllu 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.

1.2.8.2.(2). Çekme Mukavemeti

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

1.2.8.2.(3). 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). 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.

1.2.8.2.(4). Rötire

Cüruf katkılı betonların rötireleri 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).

1.2.8.2.(5). Elastisite Modülü

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

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 tarifile betonun zararlı sıvıların ve gazların difüzyonuna karşı göstereceği direnç olarak tanımlanır. Sülfatlı sular, deniz suları, klorlu sular, karbonatlı sular, termal sular, buz çözücü maddeler vb ile yapılan uzun süreli deneyler sonucunda iyi kür edilmiş cüruf katkılı betonların performanslarının zararlı kimyasal etkiler altında yüksek olduğu belirlenmiştir (Tokyay, 2003; Newman ve Choo, 2003).

1.2.8.3.(1). Permeabilite

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

1. Cürufllu betonlarda 28 gün sonrasında da hidrasyon 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, cürufllu betonların boşluk yapısı bundan daha az etkilenmektedir.

1.2.8.3.(2). 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.

1.2.8.3.(3). 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.

1.2.8.3.(4). 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.

1.2.8.3.(5). 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). 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 ($\leq 0.6 \text{ Na}_2\text{O}$) 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, $2.5\text{--}5.0 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}$ aralığında olması.

1.2.8.3.(6). Klor Geçirgenliği

Cürufllu 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 cürufllu 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 cürufllu 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. Cürufllu çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan C-S-H,

Portland çimentosuna göre daha fazla olduğundan, bağlayacağı klor iyonundan dolayı cüruf katkılı betonların klor geçirimsliliği de önemli ölçüde azalmaktadır (Onat, 1998).

1.2.8.3.(7). 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 geçirimsliliğine, 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.

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, hidrasyon için gereken suyun yok olması ve dolayısıyla betonun gereken dayanımı kazanamaması ile sonuçlanır. Betonun boşluk miktarını istenen dayanım ve dayanıklılığı sağlayabilecek şekilde azaltacak yeterli hidrasyonun 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 hidrasyon 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 hidrasyon ürünlerinin beton içerisinde üniform tarzda yer alamamış ve böylece zayıf bölgeler meydana getirmiş olmasına bağlanmaktadır (Neville, 1981). Öte yandan, betonun yeterli dayanıma ulaşabilmesi için uygulanan kürün süresi de önem teşkil etmektedir. Bu açıdan en uygunu, betonun beklenen dayanıma ulaşınca 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 hidrasyon 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 aşağıdaki koşulu sağlaması istenmekteydi:

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \geq 1 \quad (1.4)$$

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 1375 gr 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 aşağıdaki formüle göre hesaplama yapılmaktadır:

$$\text{C.A.İ} = \text{Cüruf aktivite indeksi, \%} = \frac{\text{CP}}{\text{P}} \times 100 \quad (1.5)$$

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 ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$) 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. Cürufllu 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 İnşaat Sektöründe Kullanım Alanları

1.2.11.1. Hafif Beton Agregası Olarak Kullanımı

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

1.2.11.3. Katkılı Çimento ve Beton Üretiminde Kullanımı

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

1. Portland çimentosu üretiminde kullanılan klinker, bir miktar azaltılarak yerine granüle yüksek fırın cürufu konulmaktadır. Klinker ve cüruf, bir miktar da alçıtaşı birlikte öğütülerek cürufli çimentolar elde edilmektedir. TS 20 (1992), cürufli çimentolar içerisindeki cüruf miktarını en az %20 ve en çok %80 olacak şekilde sınırlandırmıştır.

2. 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).

1.2.11.3.(1). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Cürufli Çimento Üretiminde Kullanımı

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

Cürufli Portland çimentolarının üretiminde kullanılacak granüle yüksek fırın cürufunun uygun özellikte olması gerekmektedir. Ancak Türk Standartları da dahil, bazı standartlarda, cürufli çimento üretimi için kullanılacak granüle yüksek fırın cürufunun özellikleri belirtilmemektedir. Bu nedenle, önceleri, çimento üretimi için kullanılacak cürufun uygunluğu, $\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 \geq 1$ 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, cürufli çimentoların üretiminde kullanılacak granüle yüksek fırın cürufunun aktivite indeksi, 28 günlük numuneler için, en az %75 olmalıdır (Erdoğan, 1995).

1.2.11.3.(2). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Yapımında Mineral Katkı Olarak Kullanımı

Cürufli 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. Bunlar aşağıda sıralanmaktadır (Erdoğan, 2003):

1. Ayrı öğütme, tanelerin istenilen inceliğe getirilmesinde büyük randıman sağlamaktadır. Granüle yüksek fırın cürufu, Portland çimentosu klinkerinden daha sert bir malzemedir. Cürufu 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, cürufu çimentonun depolanma özelliğinden daha iyidir. Cürufu 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 Belirttiği Değerler

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 µm göz açıklıklı elekten geçirildiklerinde, elek üzerinde kalan maksimum miktarının %20 olması ve bu cüruflarla yapılan harçların maksimum hava miktarının %12 olması belirtilmektedir. Ayrıca, cüruflarda bulunan S (kükürt) ve SO₃ 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 cürufli 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.

Endüstriyel atıkların, inşaat sektöründe ilave veya ikame malzeme olarak ya da kendi başlarına kullanılması suretiyle, inşaat mühendisliğine yeni boyutlar getireceği, yeni alanlar açacağı düşüncesinden hareketle, İskenderun Demir Çelik Fabrikası’nın atığı olan ve OYSA İskenderun Çimento Fabrikası’nda belli bir incelik değerine kadar öğütülmüş granüle yüksek cüruflarının, beton ve harç karışımlarında kullanılabilirliği araştırılmış ve cürufların suyla kendi başlarına yaptıkları, ancak yavaş seyreden reaksiyonlarını hızlandıracak kimyasal aktivatörler incelenmiştir. Bu amaçla, iki farklı ortamda kür edilmiş beton ve harç karışımları üzerinde bir dizi laboratuvar deneyleri yürütülerek, kür şartlarının cüruf içeren ve içermeyen karışımları nasıl etkilediği, yüksek fırın cürufunun karışımlar üzerinde ne şekilde etkili olduğu irdelenmiş, aktivatör içeren harçlarda karışımlara eklenecek cüruf ve aktivatör dozajının en uygun ne olabileceği soruları araştırılmaya çalışılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Günümüz beton teknolojisinde inşa edilen bir yapının, tasarlandığı ömrü boyunca, dayanıklı bir hizmet performansı, etkin maliyet, üst derece süneklik ve yüksek enerji emme kapasitesi koşullarının hepsini bir arada sağlaması gerekir. Bugün yüksek performanslı beton olarak adlandırılan ve kullanılan betonların birçoğu, gerçekte yüksek çimento dozajı ile çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip yüksek dayanımlı betonlardır. Bu tür betonlar genellikle iki şeyden olumsuz olarak etkilenirler. Birincisi, zorunlu olarak çok yüksek miktarlarda süper akışkanlaştırıcı kullanıldığından, karışımlar yapışkan kıvamdadır ve sıkıştırılmalarındaki zorluğa ilaveten erken yaşta çatlama olasılıkları yüksektir. Elde edilen deneyimlere göre bir betondaki su miktarı için kritik bir limit, bir eşik değer vardır ve bu değer altındaki karışımlarda yüksek süper akışkanlaştırıcı miktarları gerçekte zararlı olmaktadır. İkincisi, yüksek dayanımlı betonların aynı zamanda yüksek dayanıklılığa da sahip olacakları gibi yaygın ancak yanlış bir inanç vardır. Birçok deney, bu inancın geçerli veya doğru olmadığını göstermiştir. Beton karışım dizaynının sadece yüksek basınç için hesaplanmasıyla geçirgenliğin azalacağı ve bunun sonucunda, donatı çeliğinin yıpratıcı etkilere karşı, beton kalitesi ile yeterli ve otomatik olarak korunacağı varsayımları geçerli değildir. Malzemeleri ve yapıları, dayanım esasına göre tasarlamak ve sonra dayanım yolu ile dayanıklılık elde edileceğini ümit etmek temelde kusurlu bir yaklaşımdır. Beton ve betonarme yapıların performanslarına en fazla zarar veren faktörler, hizmet ve çevre koşullarının yükler ile birlikte zamana bağlı etkileri olduğundan, malzeme ve yapıların tasarımında dayanıklılık yolu ile dayanım yaklaşımını benimsemek gerekmektedir (Swamy, 2001).

Betonun en büyük avantajlarından birisi de, mühendislerin veya malzeme uzmanlarının, bileşenlerin tip ve miktarlarını seçebilme fırsatına sahip olmalarıdır. Portland çimentosu içeren taze ve sertleşmiş hallerdeki betonunun kalitesini yükseltmenin bir yolunun, puzolanik veya bağlayıcı özellikte endüstriyel yan ürünlerin betonun ana bileşenleri gibi kullanılmaları olduğu artık tamamen

anlaşılmıştır. Taze betonda, bu silissi mineral katkıları ile portland çimentosunun akılcıca birleştirilmesi, akışkanlığı ve pompalanabilirliği arttırmakta, ayrışmayı, terlemeyi ve plastik rötre olasılığını azaltmaktadır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufları da bu amaçla kullanılabilecek endüstriyel yan ürünler arasındadır. Öte yandan, yüksek fırın cüruflarının su ihtiyacını azaltma özelliği sayesinde, sıkıştırmada ve erken yaş çatlamasında problem çıkartabilen süper akışkanlaştırıcıların yüksek dozajlarda kullanımına gerek kalmaz. İlave, portland çimentosu-cüruf sistemlerinin mikro yapı ve dayanıklılık yönlerinden, portland çimentosu sistemlerinden her zaman için daha üstün olma potansiyelleri vardır. Sertleşmiş betonda portland çimentosu-cüruf sistemi, yüksek ısı farklılıklarının kontrolünü, alkali-silika reaksiyonuna neden olabilecek portland çimentosu içerisindeki alkalilerin tüketilmesini ve uzun süren pozolanik reaksiyonlar neticesinde, mikro yapının sürekli gelişmesini sağlar. Daha da önemlisi, portland çimentosu-cüruf ortaklığının en büyük katkısı, betonun içeriden veya dışarıdan gelebilecek kimyasal ve diğer yıpratıcı etkilere karşı direncini belirleyen en önemli faktör olan gözenek yapısını iyileştirmesidir.

İnşaat endüstrisinin gelişmesi için dayanım ve dayanıklılığın vazgeçilmez olduğu göz önüne alınırsa, beton kalitesini arttırmaya yönelik olarak yapılacak ilk adım, betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmek olmalıdır. Bu amaçla kullanılabilecek yüksek fırın cüruflarının inceliğinin veya özgül yüzeylerinin değiştirilmesi ya da düşük hızda seyreden reaksiyonlarının aktivatörlerle hızlandırılması gibi yöntemler, portland çimentosu-cüruf sistemlerinde görülen yavaş dayanım kazanma probleminin üstesinden gelecek; cüruf inceliği, su/bağlayıcı oranı ve ikame oranı gibi parametrelerin akılcıca belirlenerek birleştirilmesi sayesinde ise çok yüksek dayanımlı ve dayanıklılığa sahip betonların elde edilmesi mümkün olacaktır.

2.2. Kaynak Ön Araştırması

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanımının beton özellikleri üzerinde olan etkileri, aşağıda sunulmuştur.

2.2.1. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Taze Beton ve Harç Özellikleri Üzerindeki Etkileri

2.2.1.1. Su İhtiyacı ve İşlenebilirlik

İşlenebilme taze betonun katılaşma göstermeden önceki durumuyla ilgili bir özellik olduğundan dolayı çimento miktarı, cüruf ikame oranı, agrega miktarı, cüruf tipi ve bunların birbirleri ile etkileşimleri gibi faktörler, granüle yüksek fırın cürufu içeren betonların işlenebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Bir endüstri kolundan yan ürün olarak elde edilen silisli maddelerin fiziksel karakteristikleri, normal Portland çimentolu beton karışımları içine katkı olarak kullanıldıklarında karışım suyu ihtiyacını azaltma kabiliyetlerinin sebeplerini açıklamaktadır. Çimento ile kısmi olarak yer değiştirme yoluyla silisli yan ürünler içeren beton, harç ve bağlayıcıların daha iyi işlenebilirlik ve daha az su ihtiyacı göstermeleri, bu mineral katkı maddelerinin camsı ve emici olmayan yüzey yapısı ile yakından ilişkilidir (Mehta, 1989).

Betonda öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanımı, taze betonun özelliklerini etkiler. Yüksek fırın cürufu katkılı betonlarda, Portland çimentosu betonuna göre aynı kohezyonu sağlayacak şekilde su içeriğinde bir azalma olur (Reeves, 1986).

Granüle yüksek fırın cüruflarının klinkere göre daha az bir yüzey pürüzlülüğüne ve daha düşük özgül ağırlığa sahip olması sebebiyle, hacimce daha fazla çimento hamuru elde edileceğinden cüruf katkılı betonların işlenebilirliği artmaktadır (Tokyay, 2003).

Ohama ve ark. (1995), düşük su/çimento (0.20) oranında ve yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanımında, ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu harçların işlenebilirliği ile ilgili olarak yaptıkları çalışmada, cürufun çimento ile kısmi yer değişimi sonucu harçların akıcılığının iyileştiğini ve bunun cüruf inceliği ile de olumlu şekilde etkilendiğini tespit etmişlerdir.

Güllü (1996)'nın bildirdiğine göre Edward (1992), taze betona granüle yüksek fırın cürufu katkısı, artan çimento hamuru hacminden ve hamur içerisindeki

pürüzsüz kayma düzlemlerinden dolayı betonun işlenebilirliğini iyileştirmekte ve priz süresini 23°C sıcaklık için yarım saat ile bir saat arttırmaktadır.

2.2.1.2. Kanama

Wainwright ve Ait-Aider (1995)'e göre, taze betonun kanaması, çimentonun miktarına ve reaktivitesine de bağlı olarak, karışımdaki ince malzemeler tarafından kontrol edilmektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufalarının kısmi olarak Portland çimentosuyla yer değişmesi hidratasyon hızında azalmaya yol açarken, çoğu araştırmacıların da bildirdiği gibi kanamanın hem miktarında hem de hızında bir artışa neden olmaktadır. %60 gibi daha yüksek yer değişim oranlarında meydana gelen kanama ise daha fazla olmaktadır. Bu artışın ana nedeni de, cürufun çimento hamuruna girmesinin ortaya çıkardığı hidratasyon mekanizmasındaki gecikme ve buna bağlı olarak hidratasyon ürünlerinin gelişim hızındaki azalmadır.

Berktaş (1991), 2. Ulusal Beton Kongresinde, normal betonların tersine olarak çok yüksek performanslı betonların üst yüzeylerinde terleme görülmediğini, bu nedenle betonun erken kurumasına ve plastik rötre çatlaklarına engel olmak için özenli bakım gerektiğini raporör görüşü olarak sunmuştur.

Cüruf lu çimento ile yapılmış harçların kanama karakteristikleri ve granüle yüksek fırın cürufalarının tane büyüklü dağılımını araştıran Olorunsogo (1998)'a göre, tane büyüklüğü dağılımının ve su/bağlayıcı oranının etkilerine bakmaksızın, 0.35 ve 0.45 gibi her iki su/bağlayıcı oranındaki harç karışımlarında cüruf yer değişim oranının artmasıyla birlikte kanama miktarı ve kapasitesinde önemli bir şekilde artış meydana gelmektedir. Cüruf ikame oranı ve tane büyüklüğü dağılımı ne olursa olsun tüm karışımlarda, su/bağlayıcı oranının 0.35'ten 0.45'e yükselmesi, %0, %30 ve %70 cüruf katkılı harçların kanama miktarlarında sırasıyla %86, %83 ve %71 artış meydana getirmiştir. Artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte kanama miktarlarında görülen bu artış, taneler arasındaki ortalama uzaklığın daha büyük olmasının bir sonucu olarak, birbirine temas eden daha az sayıdaki tanelerin meydana getirdiği zayıf kohezif çekim kuvvetlerinden ileri gelmektedir.

2.2.1.3. Priz Süresi

Reeves (1986)'e göre, öğütülmüş yüksek fırın cürufu betonlarının priz süresi, normal Portland çimentoları ile üretilmiş betonlarınkine göre daha fazla olup, cüruf oranındaki artışla birlikte bu süre daha da uzar. Bu özellik, büyük kütle betonlarının dökümünde soğuk derzden kaçınmak için önemlidir.

6°C'den 80°C'ye kadar değişen kür sıcaklıkları altında, %50'ye kadar öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren betonların Proctor penetrasyon dayanıklılığını inceleyen Eren ve ark. (1995), kür sıcaklığının artması ile birlikte hem normal Portland çimentolu hem de cüruf katkılı betonların başlangıç ve bitiş priz zamanlarında bir azalma meydana geldiğini, daha yüksek sıcaklıklarda ise cüruf lu betonların normal Portland çimentolu betonlardan daha kısa priz zamanı gösterdiklerini bildirmişlerdir.

Hogan ve Meusel (1981), ağırlıkça %40, %50 veya %65 cüruf içeren betonların hem başlangıç hem de bitiş priz zamanlarının salt Portland çimentolu betonlarınkine göre yaklaşık bir saat kadar daha uzun olduğunu bildirmişlerdir.

Brooks ve ark. (2000), mineral katkıların yer değişim seviyelerindeki artış ile birlikte genel olarak betonların da priz zamanlarında bir uzama görüldüğünü belirterek granüle yüksek fırın cüruflarının %40 ya da daha fazla oranda ilavesinin, betonun başlangıç ve bitiş priz zamanlarında sırasıyla 11 ve 17 saatten daha fazla sürelerde önemli bir gecikme meydana getirdiğini bildirmiştir.

2.2.1.4. Hidratasyon Isısı

Yüksek fırın cüruf lu çimentoların hidratasyon ısılarını araştıran Geiseler ve ark. (1995)'na göre, yüksek fırın cüruf lu çimentolar kimyasal kompozisyonlarından dolayı, aynı mukavemet sınıfındaki diğer çimentolardan daha yavaş ve daha düşük miktarda hidratasyon ısısı açığa çıkarmaktadır. Hidratasyon ısılarının düşük olması ve ısı gelişimlerinin daha yavaş seyretmesinden dolayı, fazla miktarda cüruf içeriğine sahip olan yüksek fırın cüruf lu çimentolar, özellikle temel ve baraj gövdesi gibi büyük hacimli kütle betonlarında kullanılmak için uygun olmaktadır. Hidratasyon

ısının bir sonucu olarak böyle yapıların dış yüzeyi ile göbek kısımları arasında meydana gelen sıcaklık farklılıkları ve buna bağlı olabilecek çatlama riskleri de yüksek fırın cürufu kullanmak sureti ile azaltılabilmektedir.

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

Yüksek miktarlardaki yer değişim seviyelerinde granüle yüksek fırın cürufu kullanılması, büyük hacimli kütle betonlarının dökümünde meydana gelen yüksek sıcaklıkları ve buna bağlı ortaya çıkabilecek çatlama risklerini en aza indirmekte ve ekonomik açıdan yarar sağlamaktadır (Osborne, 1999).

Cürufun hidratasyon hızı ve ortaya çıkan sıcaklık değişimi, Portland çimentosunun hidratasyon hızından daha düşüktür. Bu nedenle, cürufun Portland çimentosuyla kısmi olarak yer değişimi, daha düşük hidratasyon hızına sahip çimento elde edilmesine olanak sağladığından, sonuçta, bu tip bir çimentoyu kullanmak suretiyle üretilen betonun sıcaklık artışı da daha düşük olmaktadır (Soroka, 1993).

Alshamsi (1997), beton karışımları içerisinde meydana gelen hidratasyon sıcaklığı üzerinde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve mikrosilikanın etkilerini araştırdığı çalışmada, değişen oranlarda cüruf ve mikrosilika içeren betonların normal Portland çimentosu içeren betonlarla kıyaslamalı olarak hidratasyon ısılarını kaydetmiştir. Çalışmanın sonucunda, hidratasyon sıcaklığındaki artış üzerinde çimento miktarının önemli bir şekilde etkili olduğunun yanı sıra, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun mikrosilikaya göre çimento hamurunda meydana gelen sıcaklık artışını daha fazla azalttığı bildirilmiştir. İlaveten, çimento ile ikame edilen bu malzemelerin pik sıcaklığa erişme süresini kesin olarak etkilediği ve granüle

yüksek fırın cürufunun pik sıcaklığa erişim süresini geciktirirken, mikrosilikanın bu süreyi hızlandığı da rapor edilmiştir.

Cürüflü çimento kullanımı hidratasyon ısını azaltarak hem maksimum beton sıcaklığını düşürmekte hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır (Bamforth, 1980; Wainwright ve Tolloczko, 1986; Tokyay, 2003).

2.2.2. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Sertleşmiş Beton ve Harç Özellikleri Üzerindeki Etkileri

2.2.2.1. Mukavemet Gelişimi

Yeau ve Kim (2005), 28. günde granüle yüksek fırın cürufu içeren betonların performanslarının, kontrol betonunun performansına benzer olduğunu, fakat 56. günde cüruf katkılı betonların, normal Portland çimentolu betona göre oldukça üstün performansa sahip olduğunu bildirmiştir. Araştırmacılara göre, %55 ikame oranına kadar tüm cüruf katkılı betonlar, 7 günden önce kontrol betonundan daha düşük basınç mukavemeti sergilemiştir. Test sonuçları, granüle yüksek fırın cüruflarının gizli bağlayıcılık özelliğinin, artan cüruf ikame oranıyla birlikte erken yaşlardaki basınç mukavemeti gelişimini yavaşlattığı, ancak 28, 56 ve 91 gün gibi sonraki yaşlarda granüle yüksek fırın cürüflü betonların basınç mukavemetlerinin, hiç cüruf katkısı içermeyen normal Portland çimentolu kontrol betonlarınkine benzer ya da daha fazla olduğunu göstermiştir.

Cüruf katkılı betonların erken yaşlardaki mukavemetleri normal Portland çimentolu betonun dayanımdan düşüktür. Ancak son dönem mukavemetleri, iyi kür edilmek şartıyla normal Portland çimentolu betonun mukavemetine eşit ya da daha fazla olmaktadır (Soroka, 1993).

Brooks ve ark. (1992), erken yaştaki mukavemetin artan cüruf yer değişim seviyesi ile birlikte düştüğünü ancak uzun dönemdeki mukavemetin ise normal Portland çimentolu betona eşit ya da daha fazla olduğunu bildirmişlerdir.

Taşdemir ve ark. (2000)'na göre, öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarında Blaine inceliği arttıkça beton daha gevrek karakterli olacağından incelik, cürufllu betonların mekanik davranışında önemli bir etkindir.

Tan ve Pu (1998), Blaine incelikleri sırasıyla 6021 cm²/g ve 5923 cm²/g olan ince öğütülmüş uçucu kül ile granüle yüksek fırın cürufunun ve bunların birleşimlerinin mukavemet üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, beton içerisinde %20 oranında ince öğütülmüş uçucu kül ya da granüle yüksek fırın cürufu kullanımının basınç mukavemetini 3 günden sonra arttırdığını, ancak ikisi arasında mukavemet açısından çok büyük bir farklılığın bulunmadığını bildirmişlerdir. Araştırmacılar, ayrıca %10 uçucu kül ve %10 granüle yüksek fırın cürufunun birlikte kullanılmasının, tüm yaşlar için basınç mukavemetini arttırdığını ve bu artışın, sadece uçucu kül ya da granüle yüksek fırın cürufu içeren betonununkinden daha fazla olduğunu, bu nedenle uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufunun birlikte kombinasyonunun, betonda silis dumanı gibi mukavemet arttırıcı katkı olarak kullanılabileceğini rapor etmişlerdir.

Nakamura ve ark. (1992), inceliğin mukavemet üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada, 453, 786 ve 1160 m²/kg gibi üç farklı inceliğe sahip cürufu, çimento ile yer değiştirme yaparak, su/bağlayıcı oranı 0.30 ve 0.40 olan ve 160–200 mm çökmeye sahip süper plastikleştirici katkılı beton numuneler üretmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, artan cüruf inceliği ile birlikte yüksek basınç mukavemetinin elde edilebileceğini bildiren araştırmacılar, %50 yer değişim seviyesinde 453 m²/kg özgül yüzey alanına sahip cüruf içeren betonların 3 ve 7 gün gibi erken yaşlarda normal Portland çimentolu betona göre daha düşük dayanım göstermesine rağmen 28.günde normal Portland çimentolu betona eşit mukavemet sergilediğini bildirmişlerdir.

Taşdemir (2003), yüksek incelik ve puzolanik aktivite değerlerine sahip mineral katkıların betonun basınç mukavemetini arttırdığını, daha kaba tanelerden oluşan mineral katkıların ise beton basınç mukavemetinde bir azalmaya neden olduğunu bildirmiştir.

Araştırmalar, çok ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile yapılan harçların basınç dayanımlarının, normal incelikteki yüksek fırın cürufu ile yapılanlara göre

daha yüksek olduğunu ve çok ince öğütmenin erken yaşlardaki dayanım üzerinde olumlu etkiler yaptığını göstermektedir. Doğulu (1998), granüle yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı özellikleri üzerine cüruf inceliğinin etkisi ile ilgili olarak yaptığı çalışmada, granüle yüksek fırın cüruflarının inceliğinin artması durumunda, hem harçların basınç mukavemetinde hem de cüruf aktive indeksinde bir artış olduğunu bildirmiştir.

Yüksek mukavemetli betonların mekanik özellikleri üzerine silis dumanı ve cüruf katkısının etkileri ile ilgili bir çalışma yapan Jianyong ve Pei (1997), beton içerisinde, süper akışkanlaştırıcı ile birlikte, çimentonun ağırlıkça %25'i oranlarında silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu kullanılmasının, betonun basınç, kırılma ve yarmada çekme mukavemetlerini arttırdığını, ancak bu artışların eş zamanlı olmayıp, basınç mukavemeti gelişiminin diğer ikisine göre daha hızlı olduğunu rapor etmişlerdir.

Fernandez ve Malhotra (1990)'ya göre, beton içerisindeki çimentonun kısmi olarak yer değişiminde kullanılan cüruf yüzdesi ve su/bağlayıcı oranı ne olursa olsun, cüruf içeren betonların 7 günlük basınç mukavemetleri her zaman için kontrol betonlarınkinden daha düşüktür. Erken mukavemetin istendiği yerlerdeki betonlarda cüruf kullanılmak istendiğinde bu duruma dikkat edilmesi gereklidir. Bu dezavantaj, beton karışım oranlarının yeniden düzenlenmesi ile düzeltilebilir. Su/bağlayıcı oranı dikkate alınmadığında, %25 cüruf içeren betonların 28 ve 91 günlük mukavemetleri kontrol betonlarının mukavemetleriyle kıyaslanabilecek düzeyde olup %50 ikame oranında test betonlarının mukavemeti ise biraz daha düşük olmaktadır. Cürufli betonların çekme mukavemetleri ise kontrol betonlarınkıyla kıyaslandığında ya biraz daha düşük ya da kıyaslanabilecek seviyededir. Hem kontrol hem de cürufli betonların etkili bir şekilde ıslak kür edilmesi tatmin edici bir mukavemet gelişimi için esas teşkil etmektedir.

Hogan ve Meusel (1981), ağırlıkça %40, %50 veya %65 yer değişim oranlarında, cürufun etkisinin 3 günlük yaşlarda genel olarak düşük olduğunu ancak ondan sonra 7 günlük yaşlarda kontrol betonlarının mukavemetine benzer ya da daha yüksek mukavemetlerin elde edildiğini bildirmişlerdir.

Ohama ve ark. (1995), 0.20 su/bağlayıcı oranı ve %3 süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımında, cüruf katkılı harçların erken yaşlardaki basınç ve çekme mukavemetlerinin cüruf yer değişim oranı ile olumsuz olarak etkilendiğini, ancak, ileri dönemlerdeki basınç ve çekme mukavemetlerinin kontrol harçlarınıninkilerle kıyaslanabilir düzeyde ya da daha fazla olduğunu bildirmişlerdir.

Yüksek sıcaklıklarda kür edilen cürufllu çimento ve normal Portland çimentosu betonlarının erken yaşlardaki mukavemet gelişimi ile ilgili olarak bir çalışma yapan Brooks ve Al-Kaisi (1990), cürufun çimento ile kısmi olarak yer değişiminin sıcaklık artışını azaltarak pik sıcaklığa erişim zamanını arttırdığını, erken yaşlardaki mukavemet gelişiminin de kür sıcaklığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

300, 400, 500 ve 600 m²/kg gibi farklı incelik değerlerine sahip yüksek fırın cüruflarını, %50'den %80'e kadar değişen ikame oranlarında 300 m²/kg incelikli çimento içerisinde kullanmak suretiyle ürettikleri cüruf katkılı betonların özellikleri üzerinde bir çalışma yapan Sakai ve ark. (1992), elde ettikleri deney sonuçlarına göre, artan cüruf inceliği ile birlikte basınç mukavemetinin de arttığını bildirmişlerdir.

Sivasundaram ve Malhotra (1992), yüksek miktarda granüle yüksek fırın cürufu ve düşük miktarda Portland çimentosu içeren betonların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. 7 günden sonra, büyük oranda cüruf içeren betonlar, kontrol betonlarına kıyasla benzer basınç mukavemetleri geliştirmişlerdir. Aynı zamanda, büyük miktarda cüruf içeren bu betonlar daha sonraki yaşlarda kontrol betonlarından daha yüksek basınç dayanımı göstermişlerdir.

2.2.2.2. Elastisite Modülü ve Sünme

Ağırlıkça %30'dan %70'e kadar değişen oranlarda cüruf içeren ve suda kür edilmiş cürufllu çimento betonlarının sekant elastisite modülleri, erken yaşlarda Portland çimentosu ile yapılan betonlarıninkilerle benzer olmasına karşın, sonraki dönemlerde daha fazla olmaktadır. Ancak, havada kür edilmiş cürufllu çimento betonlarının son yaşlardaki elastisite modülleri ıslak kür edilmiş olan yüksek fırın cürufllu betonlarınkinden daha düşüktür (Brooks ve ark., 1992).

Dayanımlar için belirtilmiş olan durum Elastisite Modülü için de geçerlidir. Eşit 28 günlük dayanımlar için, cürufu çimento kullanılarak yapılmış olan betonların Elastisite Modülleri az bir miktar daha yüksek olmaktadır (Bamforth, 1980; Wainwright, 1986; Wainwright ve Tolloczko, 1986; Tokyay, 2003).

Geleneksel betonlar ile kendiliğinden yerleşen yüksek mukavemetli betonlar arasındaki mekanik özellikleri karşılaştıran Persson (2001), elastisite modülü, sünme ve rötre özellikleri açısından, kendiliğinden yerleşen betonlar ile normal betonların arasında önemli bir fark bulunmadığını, erken yaşlarda yapılan yüklemenin kendiliğinden yerleşen betonların sünme katsayısını arttırdığını, daha sonra ise bu betonların normal betonlarla aynı davranışı sergilediğini ifade etmiştir.

Yüksek fırın cürufu çimento içeren betonların sünme mekanizmalarını araştıran Chern ve Chan (1989), elde ettikleri sonuçlardan, normal Portland çimentolu betonların sünme şekli-zaman eğrilerinin, bir başka deyişle sünme davranışlarının yüksek fırın cürufu içeren betonlarınkilerle benzer olduğunu, nem kaybının olmadığı kür şartlarında, artan cüruf yer değişim oranı ile birlikte betonun sünmesinin de azaldığını, öte yandan kuru kür şartları altında yüksek fırın cürufu içeren betonların normal Portland çimentosuyla yapılanlardan daha fazla sünme deformasyonu gösterdiğini bildirmişlerdir.

Jianyong ve Yan (2001), yüksek performanslı betonların sünme ve kuruma rötreleri üzerine yaptıkları çalışmalarında, öğütülmüş yüksek fırın curufunu ve silis dumanını dolgu malzemesi olarak Portland çimentosuna ikame etmişler, en yüksek sünme değerini şahit betonların, daha sonra curuf katılan betonların ve en düşük sünme değerini ise silis dumanı ve curufun birlikte kullanıldığı betonların verdiğini ifade etmişlerdir.

2.2.2.3. Isıl Genleşme

Betonun ısı genleşme özellikleri büyük ölçüde kullanılan agrega tipi ve özelliklerine bağlı olduğundan, çimento tipinin önemli bir etkisi söz konusu değildir (Wainwright, 1986; Tokyay, 2003).

2.2.2.4. Rötire

Yüksek fırın cürufu çimento içeren betonların rötire mekanizmalarını araştıran Chern ve Chan (1989), elde ettikleri sonuçlardan, normal Portland çimentolu betonların rötire şekli-zaman eğrilerinin, bir başka deyişle rötire davranışlarının yüksek fırın cürufu içeren betonlarınkilerle benzer olduğunu, uygulanan kür süresi ve test şartlarının yüksek fırın cürufu betonun dayanım kazanmasını ve buna bağlı olarak rötire deformasyonlarını etkilediğinden, betonda kür eksikliğinin ve fazla miktarda cüruf kullanımının ağırlık kaybını ve rötreyi arttırdığını bildirmişlerdir.

Kutti ve ark. (1992), ağırlıkça %70 gibi fazla miktarda yüksek fırın cürufu içeren çimentoların rötresi üzerine yaptıkları çalışmalarında, fazla miktarda cüruf ihtiva eden yüksek fırın cürufu çimentoların kuruma rötirelerinin, ortamdaki relatif nemden oldukça etkilendiğini, nemin %60'tan az olduğu kuru iklimlerde cürufu çimentoların rötirelerinin daha fazla iken, nemin yüksek olduğu ($RH > \%70$) ortam şartlarında, cürufu çimentoların kuruma rötiresinin yaklaşık olarak normal Portland çimentosununkiyle aynı ya da ondan daha da az olduğunu bildirmişlerdir.

Newman ve Choo (2003), granüle yüksek fırın cürufu kullanımının betonun kuruma rötresi üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğunu bildirmiştir.

0.35 su/bağlayıcı oranında üç farklı çimento çeşidi (Portland çimentosu, yüksek fırın cürufu çimento ve ikisinin yarı yarıya birlikte kullanıldığı çimento) ile hazırladıkları yüksek performanslı betonların, erken yaşlardaki rötresi üzerine çimento tipinin ve kür sıcaklığının etkisini araştıran Lura ve ark. (2001), 10, 20, 30 ve 40°C gibi dört farklı kür ortamlarında bekletilen betonların kendi yapısından kaynaklanan otogen deformasyonlarını incelemişlerdir. Araştırmacılar, yüksek sıcaklıkların genel olarak daha hızlı rötire gelişimine ve çatlama riskini arttırabilecek gerilmelere neden olduğunu bildirmişlerdir. Öte yandan, yazarlar, 10 ve 20°C gibi düşük sıcaklıklarda çatlama görülmemesine karşın, daha yüksek kür sıcaklıklarında deformasyonların yüksek oranlara ulaşması sebebiyle çatlama riskinin artacağı inancından ötürü, düşük sıcaklıklarda kür edilen numunelerin bile sonraki yaşlarda çatlayabileceğinin unutulmaması gerektiğini bildirmişlerdir. Yapılan çalışmada elde

edilen bir başka bulgu da, tüm sıcaklıklarda yüksek fırın cürufu çimento içeren betonların 6. günün ardından Portland çimentolu betonlara göre daha yüksek rötre değerleri gösterdikleridir. Araştırmacılara göre bu durum, daha küçük boşluklara sahip yüksek fırın cürufu çimento hamurunun daha yoğun yapısıyla ilişkilidir. Bu daha küçük boşluklar, kendi kendine kuruma olayı esnasında otogen rötreyi artırarak daha yüksek kapiler kuvvetlere neden olduklarından, yüksek fırın cürufu içeren karışımların çatlama riskleri ve kendi iç gerilmeleri daima göz önüne alınmalıdır. Ancak, yüksek fırın cürufu betonlar daha uzun priz zamanı ve daha yavaş mukavemet gelişimi gösterdikleri için bu yüksek otogen deformasyon Portland çimentolu betonlara göre daha yüksek gerilmeler meydana getirmemektedir.

Neville ve Brooks (1993), beton karışımında çimento miktarında meydana gelen azalmanın ve su/bağlayıcı oranındaki düşüşün rötrenin de azalmasına sebep olduğunu bildirmişlerdir.

2.2.3. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Betonun Durabilitesi Üzerindeki Etkileri

2.2.3.1. Sülfat Etkisine Dayanıklılık

Sertleşmiş betonun içerisine sızan sularda Na_2SO_4 veya MgSO_4 gibi sülfatlar bulunduğu takdirde, kalsiyum hidroksit ile sülfatlar arasındaki reaksiyonlar sonucu alçıtaşı meydana gelir. Daha sonra, sertleşmiş çimentonun bünyesinde bulunan yarı-kararlı yapıdaki kalsiyum alumino monosülfhidrat ($\text{C}_4\text{ASH}_{12}$) ile sülfat etkisiyle meydana gelen alçıtaşı arasındaki reaksiyonlar, kalsiyum alumino trisülfhidrat veya diğer adıyla etrenjit ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$) oluşmasına yol açar. Sertleşmiş betonun içerisinde bu etrenjit kristallerinin oluşması, çok büyük genleşmeler yaratmakta, betonun çatlayıp parçalanmasına yol açmaktadır (Erdoğan, 2003).

MgSO_4 , CaSO_4 ve Na_2SO_4 eriyiklerinin kullanıldığı bir araştırmada 130 değişik çimento kullanmış ve yüksek fırın cürufalarının, miktarlarıyla orantılı olarak, sülfat direncini arttırdığı saptanmıştır (Guyot ve ark., 1983; Tokyay, 2003).

Portland çimentosunun sırasıyla, %45 ve %72 oranlarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilmesi sonucu elde edilen cüruf katkılı betonların 10.5 yıl

3000 mg/lt SO₄ çözeltisinde bekletilmesinin sonucunda herhangi bir bozulma göstermemesine rağmen, %3.5'ten %12.3'e kadar değişen miktarlarda C₃A içeriğine sahip normal Portland çimentolu betonlar bundan zarar görmüştür (Hooton ve Emery, 1990).

Frearson ve Higgins (1992), 0.45 ve 0.60 olmak üzere iki ayrı su/bağlayıcı oranlarında üretilen, %11.5 ve %15.5 gibi iki farklı alümin içeriğine sahip yüksek fırın cürufu içeren betonların sülfat dayanıklılığını araştırmıştır. Araştırmacılar çalışma sonuçlarından, yüksek su/bağlayıcı oranı ve düşük cüruf ikame oranlarında sülfat atağına bağlı çatlamlar meydana geldiğini, ancak, her iki tip cürufun da İngiltere'deki mevcut şartnamelerde belirtilen su/bağlayıcı oranı ve cüruf ikame seviyelerinde kullanıldığında sülfata karşı dayanıklılık sergilediklerini bildirmişlerdir.

Deniz ve sülfat ortamlarında bırakılmış cüruf içeren beton ve harçların üç yıl gibi uzun dönemdeki özelliklerini araştıran Hinczak ve Cao (1992)'a göre, %60 veya daha fazla yer değişim oranlarında hazırlanmış yüksek fırın cürufu katkılı harç ya da betonlar, deniz suyu ve sülfat atağı nedeniyle bozulmaya ve klor girişine karşı arttırılmış dayanıklılık sağlamakta, ancak %60'ın altındaki yer değişim seviyelerinde cüruf katkılı harç ve betonlar özellikle sülfat ortamlarında Portland çimentolu harç ve betonlar kadar iyi performans sergilememektedir.

Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine farklı kür şartlarının etkisini araştıran Türkmen (2003), değişik ikame oranlarında silis dumanı ve yüksek fırın cürufu içeren beton numunelerin magnezyum sülfat çözeltisinde, sodyum klorür ve sodyum sülfat çözeltilerindekilere göre daha fazla bozulma gösterdiklerini, yüksek fırın cürufu numunelerin korozyon etkilerine karşı durabilitesinin, silis dumanı ve Portland çimentolu numunelerinkinden daha yüksek olduğunu rapor etmiştir.

Ağırlıkça %5-30 oranında çimento yerine puzolan kullanımı ya da 175°C ve yukarı sıcaklıklarda yüksek basınçlı buhar kürü, betonun sülfatlara karşı direncini arttırmada etkili olmaktadır. Buhar kürü yapılacaksa, betonda sülfat dirençli çimento ve normal Portland çimentosu da kullanılabilir (Şimşek, 2004).

2.2.3.2. Klor Etkisine Dayanıklılık

Hızlandırılmış klor permeabilite deneyi uygulanarak yapılan bir araştırmada değişik inceliklerde ve değişik cüruf miktarı içeren çimentolar kullanılarak 102 mm çap ve 51 mm boyda silindir harç numuneleri hazırlanmış ve 14 günlük standart bakımdan sonra numunelerin bir yüzü sodyum klorür diğer yüzü sodyum hidroksit eriyiklerine batırılarak 60 V sabit potansiyel farkı uygulanmış ve bir yüzden öbürüne geçen elektriksel akım ölçülerek klor permeabilitesi ile ilişkilendirilmiştir. Araştırmanın sonucunda artan cüruf inceliği ile klor geçirimliliğinin azaldığı, cüruf katkılı betonların klor geçirimliliği konusunda Portland çimentolarından daha etkili olduğu tespit edilmiştir (Roy, 1989; Tokyay, 2003).

Dört farklı cüruf yer değişimi (%0, %25, %50 ve %75) yapılarak üretilen betonların özellikleri üzerinde, otoklav kürü (175°C, 0.5 MPa), buhar kürü (80°C) ve normal kür (20°C, %100RH) gibi değişik kür şartlarının etkileri ile ilgili bir çalışma yapan Aldea ve ark. (2000), durabilitenin iyileştirilmesi için oda sıcaklığında uygulanan kürün en iyisi olduğunu, erken mukavemet gelişiminin istenmesi durumunda ise otoklav kürü yerine buhar kürünün tercih edilebileceğini ve son olarak, cüruf yer değişimindeki artış ile birlikte klorür geçirgenliğinde de bir azalma meydana geldiği, uygulamaya da bağlı olarak, mukavemeti artırmak ve klorür geçirgenliğini azaltmak için değişik cüruf yüzdelerinin kullanılabileceğini rapor etmişlerdir.

Geiseler ve ark. (1995)'na göre, klorürler çevresel şartlara bağlı olarak beton içerisine girebildiğinden, betonda yüksek oranlarda granüle yüksek fırın cürufunun kullanılması, betonun dayanıklılığını klorür girişine karşı belirgin bir şekilde arttırmaktadır.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanımının en yararlı etkilerinden biri, klorun geçiş hızını ve dolayısıyla klorun neden olduğu korozyonu önemli ölçüde azaltmasıdır (Bijen, 1994).

Bununla birlikte, Dhir ve ark. (1996), öğütülmüş yüksek fırın cürufunun, normal Portland çimentosu hamuruna göre daha yüksek klor bağlama kapasitesine sahip olduğunu ve bu farkın cüruf ikame miktarı ile arttığını göstermişlerdir.

Betonun geçirimsizliği, betona (veya çimento hamuruna) çözeltilerin veya gazların ilerlemesini ve ilerlemenin hızını kontrol eder. Betonun geçirimsizliği su/bağlayıcı madde oranından etkilenir. Klor iyonları çok tahrip edicidir. Buna özellikle kış aylarında buz çözücü olarak kullanılan tuzlar neden olur. Granüle yüksek fırın cürufu kullanmak suretiyle klor difüzyonu riski önemli ölçüde azalmaktadır (Reeves, 1986).

Donatılı betonların korozyon davranışı ve durabilitesi üzerinde öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının etkisini araştıran Cheng ve ark. (2005)'na göre cüruf, alkali ortamda önce suyla, ardından kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek puzolanik reaksiyonlar neticesinde bağlayıcı özelliğe sahip ilave C-S-H jellerini meydana getirir. Daha yoğun mikro yapı veya daha düşük porozite, beton içerisindeki donatıların korozyon olasılığını da azaltmakta ve daha yüksek durabilite sağlamaktadır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun ilavesinden dolayı pH değerindeki azalma cüruf içeren betonun korozyon dayanıklılığı üzerinde zararlı bir etki göstermemektedir.

Roy ve Idorn (1982), cüruf katkılı çimentolar ile üretilen betonların hareketli iyon difüzyonuna karşı direncinin, Portland çimentosu ile üretilenlere göre belirgin bir biçimde yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Yüksek fırın cüruflarının Portland çimentosu ile kısmi olarak yer değişmesi ile elde edilen betonların klorür geçirgenliğini araştıran Fernandez ve Malhotra (1990), 28 günlük test sonuçlarına göre, beton içerisinde çimentonun cürufla kısmi olarak yer değiştirilmesi durumunda, betonun klor geçirgenliğinde de azalmalar olduğunu bildirmişlerdir.

Çalışmalar, 0.70 gibi yüksek su/bağlayıcı oranında hazırlanmış, %40 ve %70 cüruf katkısı içeren betonların klor geçirgenliğinin, 0.50 su/bağlayıcı oranında hazırlanmış normal Portland çimentolu betonların klorür geçirgenliğinden önemli bir şekilde daha düşük olduğunu göstermiştir (Smolczyk, 1977; Newman ve Choo, 2003).

Hem laboratuvar hem de yapılardan alınan karot numuneleri üzerinde yürütülen son zamanlardaki çalışmalar, Portland çimentosu betonlarının klor geçirgenliği katsayılarının zamanla fazla bir değişim göstermediğini ancak, cüruf

katkılı betonların klor geçirgenliği katsayılarında ise önemli ölçüde bir düşüş olduğunu göstermiştir (Bamforth, 1993; Newman ve Choo, 2003).

Onat (1998), 28 günlük sonuçlar göz alındığında, Portland çimentosuyla yapılan numunelere göre, %25 cüruf ihtiva eden numunelerin %50, %50 cüruf ihtiva eden numunelerin %70 ve %75 cüruf ihtiva eden numunelerin de %87 oranında klor iyonu geçirimsizliğini azalttığını bildirmiştir.

Klor atağının değişik kür şartlarına maruz bırakılmış uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu içeren harçların özellikleri üzerine etkilerini araştıran Otsuki ve ark. (1992), bu mineral katkıların harçlar içerisine yerleştirilen çelik çubukların korozyonunu önlemede ve harçların klor penetrasyonuna karşı geçirgenliğini arttırmada oldukça etkili olduğunu, öte yandan, püskürtme şeklinde uygulanan kürün, ıslak ve kuru küre göre daha hızlı klorür ve oksijen difüzyonuna yol açtığını bildirmiştir.

2.2.3.3. Deniz Suyu Etkisine Dayanıklılık

Regourd (1986), deniz suyuna tamamıyla batırılmış 40x40x160 mm ebadındaki harç numuneleriyle yaptığı deneysel çalışmasında, deniz suyu tesirine karşı, kullanılan cüruf miktarının etkisini araştırmış ve çimento içindeki granüle yüksek fırın cürufu miktarının artmasıyla genişlemenin azaldığını saptamıştır.

Çizelge 2.1. Deniz suyuna batırılmış harç numunelerinde bir yıl sonra meydana gelen boy uzamaları (Regourd, 1986)

Bağlayıcı Malzeme	$\Delta l/l$ (mm/m)
Portland Çimentosu	1000
%75 P.Ç + %25 ÖGYFC	750
%70 P.Ç + %30 ÖGYFC	690
%20 P.Ç + %80 ÖGYFC	190

100 mm lik küplerden hazırladığı cürufllu ve değişik C_3A içeriklerindeki Portland çimentolu betonların gel-git tesiri ve deniz suyu altındaki performansları üzerine araştırma yapan Osborne (1992), elde ettiği sonuçlardan, tamamen deniz

suyu altındaki %70 cüruf katkılı betonların iyi mukavemet geliştirdiğini ve orta seviyedeki klorür geçirgenliği ile daha az kimyasal saldırıya maruz kaldığını bildirmiş, bunların yanında, %60 cüruf katkılı betonların en yüksek klorür difüzyonuna sahip betonlar olduklarını, %80 cüruf katkılı betonların ise düşük mukavemet gelişimlerine rağmen en az klorür geçirgenliği gösterdiklerini rapor etmiştir.

2.2.3.4. Karbonatlaşmaya Dayanıklılık

Karbonatlaşma, CO₂ gazının betona nüfuz etmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu nüfuz, betonun geçirgenlik ve gözeneklilik özellikleriyle bağlantılıdır. Bu nedenle, betonun hem gözenekliliği hem de geçirgenliği karbonatlaşma mekanizmasında önemli rol oynamaktadır.

Bunlardan başka, betonun karbonatlaşma oranı; kür durumu, su-bağlayıcı oranı, betonun karbonatlaşmaya maruz kaldığı ortam sıcaklığı ve bağıl nemi, kullanılan mineral katkıların özelliklerine bağlıdır. Puzolanik mineral katkı maddelerinin genellikle betonun gözenekliliğini azalttığı ve böylece geçirgenlikte azalmaya neden olduğu bilinmektedir. Geçirgenliğin azalması, CO₂'in beton bünyesinin derinliklerine ulaşmasını geciktirmektedir.

Zhang ve ark. (2004), 3460 cm²/gr özgül yüzey alanına sahip normal incelikte öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile 8380 cm²/gr yüzey alanına sahip çok ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu Portland çimentosuyla %50 oranında yer değişime uğratmak suretiyle ürettikleri iki farklı karışımdan 80x20x20 mm ebadında numuneler hazırlamışlardır. Araştırmacılar, prizmatik numunelerden elde ettikleri karbonatlaşma değerlerine göre, çok ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu betonun, normal incelikte öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren diğer betona göre karbonatlaşma dayanıklılığı açısından üstün özellikler gösterdiğini, cürufu çok ince öğütmenin, sertleşmiş çimento hamurunda daha yoğun bir yapı meydana getirmesinden dolayı, hamur içerisine karbondioksit (CO₂) girişini engellediğini bildirmişlerdir.

Karbonatlaşma açısından, ortamda yeterli rutubet bulunduğu ve beton yeterince yoğun olduğu sürece, Portland çimentosuyla cürufli çimento arasında bir fark yoktur. Yapılan bir araştırmada, %80'in üzerinde cüruf içeren çimentoların, betonarme donatılarında görülen ve karbonatlaşmanın neden olduğu paslanmayı Portland çimentoları kadar etkin bir şekilde önlediği saptanmıştır. Öte yandan bir başka araştırmada ise, 1, 3 ve 7 gün gibi daha kısa süreliğine bakımı yapılan harç numunelerinde yukarıda belirtilenin tam tersi sonuçlar alınmıştır. Sözü edilen bu araştırmada, karbonatlaşma direncinin arttırılabilmesi için bakım süresinin uzatılması gerektiği belirtilmiştir (Tokyay, 2003).

Jones ve ark. (1997), silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılarından herhangi ikisinin farklı oranlarda Portland çimentosu ile karıştırılması sonucu elde edilmiş üçlü bağlayıcı içeren betonların, salt Portland çimentolu ve Portland çimentolu-uçucu kül katkılı ikili bağlayıcı içeren betonlara kıyasla karbonatlaşma derinliklerini ve klorür girişinin mertebesini incelemişlerdir. Araştırmanın sonuçlarına göre, üçlü bağlayıcı içeren betonların karbonatlaşma derinliklerinin, hem Portland çimentolu hem de Portland çimentolu-uçucu kül katkılı kontrol betonlarının karbonatlaşma derinliklerinden önemli bir şekilde daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. Üçlü karışımlardan elde edilen karbonatlaşma derinlikleri, kontrol betonlarınınkinden ortalama olarak 2.5 kat daha fazla olup, yükselen çimento yer değişim seviyesi ile birlikte artış göstermektedir.

Ülkemizde TS EN 197-1 (2002) standardına göre imal edilmeye başlanan yeni tip çimentolarla 0.45 ve 0.65 gibi iki farklı su/bağlayıcı oranında üretilen betonların test gününe kadar sürekli havada bekletilerek kontrolsüz bağıl nem ve sıcaklık şartlarına maruz bırakıldığı ortamdaki basınç dayanımı ve karbonatlaşma derinliği üzerinde deneysel çalışmalar yapan Güneyisi ve ark. (2003), en yüksek karbonatlaşma derinliği değerlerinin CÇ 42.5 çimentosu ile elde edildiğini ve su/bağlayıcı oranındaki artışın karbonatlaşma derinliği değerlerinde de bir artış meydana getirdiğini bildirmişlerdir.

Kimyasal katkıların sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkilerini araştıran Özkul ve Yıldırım (1996)'a göre, karbonatlaşma derinliği su/bağlayıcı oranındaki artışla birlikte artmaktadır.

Mukavemet ve karbonatlaşma derinliği arasındaki ilişki üzerine cüruf etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, dış ortam şartlarına maruz bırakılmış küplerden elde edilen sonuçlar, 28 günlük basınç mukavemeti esas alındığında, yüksek fırın cürufu katkılı betonların karbonatlaşma derinliklerinde büyük artışlar olmasına rağmen 30 MPa'nın üzerindeki dayanımlar için farklılıkların pratik olarak önem taşımadığını işaret etmektedir (Osborne, 1986; Newman ve Choo, 2003). Öte yandan bazı durumlarda, cürufllu betonların karbonatlaşma derinliklerinin, 0.45'in üzerindeki yüksek su/bağlayıcı oranlarında önemsenecek kadar yüksek olduğu bulunmuştur. Ancak, İngiltere'de yürütülen eski beton yapılar üzerindeki ilave araştırmalar, cürufllu ve cürufsuz betonların karbonatlaşma derinlikleri arasında farklılıklar bulunmadığını göstermiştir. Yine, İngiltere'de yapılan benzer araştırmalarda, dış koşullardan korunan kapalı ortamlardaki cürufllu betonların karbonatlaşma derinliklerinde, %65 gibi yüksek cüruf ikame oranı için, artış olduğu, ancak yağmura maruz cürufllu betonların karbonatlaşma derinliklerinde ise hemen hemen hiçbir farklılığın bulunmadığı gözlenmiştir (Newman ve Choo, 2003).

Bağlayıcı malzeme olarak çimentonun bir kısmı ile ikame edilen ve %50'ye kadar cüruf içeren betonların normal ve ılıman ortam koşullarındaki karbonatlaşma miktarlarının Portland çimentolu betonlarınkilerle muhtemel olarak benzer olduğunu bildiren Osborne (1999)'a göre, klorür, sülfat ve deniz suyu geçirgenliğine karşı kimyasal dayanıklılığın istendiği yerlerde %70 gibi yüksek oranlarda cüruf yer değişimi kullanılabilir. Ancak, karbonatlaşma riskinin yüksek olduğu çevre şartlarında ve genel inşaatların ince kısımlarında, hem kür hem donatı pas payı konusunda gerekli özel önlemler alınmalı, bu tip yerlerde cüruf yer değişim oranı %50 ile sınırlandırılmalıdır.

Sakai ve ark. (1992), 300, 400, 500 ve 600 m²/kg gibi farklı incelik değerlerine sahip yüksek fırın cürufllarını, %50'den %80'e kadar değişen ikame oranlarında 300 m²/kg incelikli çimento içerisinde kullanmak suretiyle ürettikleri cüruf katkılı betonlar üzerinde bir çalışma yapmıştır. Elde ettikleri deney sonuçlarına göre, artan cüruf ikame oranı ile birlikte karbonatlaşma değerlerinde de bir artış olmaktadır.

Kimyasal ve mineral katkılı yüksek mukavemetli betonların karbonatlaşmaları ile ilgili bir çalışma yapan Almeida (1992), karışım suyunu azaltmak amacıyla kullanılan süper plastikleştirici katkıların, betonların karbonatlaşma derinliğini azaltmada kendi başlarına etkili olabildiğini, uygun kürün yapılamadığı agresif çevre koşullarına maruz kalmış mineral katkılı betonların da karbonatlaşmaya karşı yeterli direnci gösteremediğini bildirmiş, son olarak da su/bağlayıcı oranı ile karbonatlaşma derinliği arasında oldukça iyi bir ilişkinin olduğunu rapor etmiştir.

Betonlarda görülen karbonatlaşma miktarının, bir dereceye kadar, mukavemet gelişimi ve mevcut kireç kapasitesi ile sınırlı olduğunu bildiren Bijen (1996), düşük hidratasyon hızına sahip betonların, erken yaşlarda kuru ortam şartlarına maruz bırakıldıklarında, hidratasyon hızı yüksek betonlara göre daha hızlı karbonatlaşma gösterdiklerini, öte yandan, cüruf ve uçucu kül katkılı betonların, Portland çimentolu betonlara göre daha düşük kireç içeriğine sahip olmalarına rağmen, hidratasyon hızları yavaş olduğundan yetersiz kür şartları altında yüksek karbonatlaşma değerleri sergilediklerini rapor etmiştir.

2.2.3.5. Aşınmaya Dayanıklılık

Fernandez ve Malhotra (1990), granüle yüksek fırın cürufu içeren betonların aşınma dayanıklılığı ve mekanik özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada, cürufllu betonların mukavemet gelişimlerinin, granüle yüksek fırın cürufllarının beton içerisinde kısmen çimento yerine kullanılabileceğini işaret ettiğini ancak cürufllu betonların aşınmaya karşı dirençlerinin cüruf içermeyen kontrol betonlarındakinden daha düşük olduğunu rapor etmişlerdir.

Uygun ve yeterli kür uygulanması şartıyla, betonda yüksek fırın cürufu kullanılması aşınma dayanıklılığında bir miktar avantaj sağlamaktadır. Ancak, cüruf katkılı betonlar yeterli kürün yapılamadığı durumlardan portland çimentolu betonlara göre daha fazla etkilenmiş olsa bile tüm betonların aşınma dayanıklılığı önemli bir şekilde azalmaktadır (Newman ve Choo, 2003).

2.2.3.6. Donma – Çözülme Direnci

Beton içindeki boşlukların yapısı ve dağılımı betonun performansını etkilemektedir. Çok küçük boşluklar içinde bulunan su -20°C 'de donmaktadır. Bununla beraber, büyük boşluklar içinde bulunan suyun donması 0°C 'de gerçekleşmektedir. Teorik olarak, küçük boşluklara sahip olan beton, büyük boşluklara sahip betona göre daha iyi donma-çözülme davranışı gösterir. Boşluklardaki su donduğunda, suyun kapladığı hacim yaklaşık %9'a kadar artmaktadır. Bu yüzden donmuş su miktarının hacmindeki artış betonda iç gerilmeler oluşturur. Şayet katılaşmış beton uygun miktarda hava içeriğine sahip ise, betonda oluşan iç gerilmeler azaltılabilir. Burada hava kabarcıkları, buzun genleşmesinden dolayı oluşacak hacim artışlarına yer sağlama görevini yerine getireceklerdir.

Yüksek fırın cüruflarının, betonların donma-çözülme dirençleri üzerine etkileri, Portland çimentolarına göre, dayanım ve betonun hava miktarı sabit olması durumunda pek farklı değildir. Ancak, yüksek miktarlardaki cüruf ikame oranlarında, bu dirençte az bir miktar düşüş görülebilir. Öte yandan, yüksek fırın cürufu kullanımının beton içindeki gözenek boyutlarında, gerek fiziksel gerekse hidrasyon sonucunda, azalmaya neden olması betonun donma çözülme direncini yükselttiği görüşü de öne sürülmektedir. Yapılan tüm araştırmalarda hem fikir olunan bir sonuç, cüruf katkılı betonların sabit bir hava miktarı sağlamak için, Portland çimentolarına göre daha fazla hava sürükleyici katkıya ihtiyaç duydukları hususudur (Virtanen, 1989; Pigeon ve Regourd, 1989; Malhotra, 1989; Tokyay, 2003).

Normal Portland çimentosu ile 500 ve 700 m^2/kg gibi iki farklı inceliğe sahip yüksek fırın cürufllu çimentonun kullanıldığı ve cüruf yer değişim oranlarının ağırlıkça %30 ve %50 olduğu deneysel bir çalışmadan elde edilen sonuçlar, yüksek fırın cürufu kullanılmasının betonun donma-çözülme direncini arttırdığı, öte yandan inceliği yüksek cüruf kullanımının donma çözülme direncini arttırmakta yararlı olduğu ve bu artan direncin özellikle çimento hamurunun yoğun yapısından ve cüruf kullanılmasına bağlı olarak çimento hamurunda bulunan boşluk çaplarındaki azalmadan ileri geldiği rapor edilmiştir (Fukudome ve ark., 1992).

Genel olarak, belirli bir mukavemet ve hava miktarı için cürufllu betonların donma-çözülme dayanıklılığı başlangıçta düşüktür. Ama döngü sayısının artmasıyla birlikte bu farklılık gittikçe azalır ve donma-çözülme direncinde yüksek fırın cürufları daha etkin bir rol oynar. Bu farklılığın muhtemel sebepleri tam olarak kesin olmasa da bunun cüruf kullanılmasına bağlı olarak beton içerisindeki boşlukların daha ince olmasından ileri geldiği öne sürülmektedir (Bijen, 1996).

Yüksek fırın cürufllu çimento içeren betonların buz çözücü tuzlara ve donma etkisine karşı dayanıklılığı ile ilgili bir çalışma yapan Deja (2003), %57 oranında yüksek fırın cürufu içeren çimento ile ürettiği dört farklı grup beton için hazırlanan 15 cm'lik küp numuneler üzerinde 50 devirlik donma-çözülme döngüsü uygulamıştır. Numunelerin bu döngü sonundaki ağırlık kaybı sonuçlarına göre, hava sürükleyici katkı içermeyen beton erken yaşlarda ciddi bir şekilde zarar gördüğü için 14 döngü sonunda deney sonlandırılırken hava sürükleyici katkısının betonda kullanılması ile birlikte donma-çözölmeye karşı dayanıklılık da artmıştır. Hava sürükleyici katkı içermeyen cüruf çimentolu betonlar, normal Portland çimentolu betona göre önemli bir şekilde daha düşük hava miktarına sahiptir. Taze beton içerisindeki hava sürükleyici katkının etkinliği, Portland çimentolu betona göre, cüruf çimentolu betonlarda çok daha azdır. Bu nedenle, aynı hava miktarı için, cüruf çimentolu betonlar, normal Portland çimentolu betona göre, iki kat daha fazla hava sürükleyici katkı dozajına gereksinim duymaktadır.

2.2.3.7. Asit Etkisine Dayanıklılık

Asidin bütün Portland çimentolarına önemli etkisi vardır. Asit etkisinin derecesi, asidin pH'ı gibi birçok faktöre bağlıdır. Cürufllu çimento ile üretilen betonlar 3.5 ile 5.5 pH derecesine sahip ortamda asit etkisine karşı yararlı olabilir. Bununla birlikte 3.5'in altındaki pH değerleri için ek koruma önlemleri gereklidir (RMC, 1991 : Taşdemir ve ark., 2000).

Öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren betonların özelliklerini araştıran ve bu amaçla %40 uçucu kül içeren beton ve salt Portland çimentolu kontrol betonları hazırlayan Li ve Zhao (2003), bu betonların kısa ve uzun

dönemdeki performanslarını incelediği çalışmasında, 3 günlük ıslak kürün ardından, oda sıcaklığında 4, 8, 16 ve 50 haftalık süreyle %2 H₂SO₄ çözeltisinin içine bırakılan 100x100x300 mm boyutlarındaki test numunelerinden elde ettiği deney sonuçlarına göre, %15 yüksek fırın cürufu ve %25 uçucu kül içeren betonların asit atağına karşı hem Portland çimentolu hem de %40 uçucu küllü betonlardan daha üstün olduğunu, 50 haftanın sonunda meydana gelen ağırlık değişimlerinin de yaklaşık %8 civarında çıktığını bildirmiştir. Portland çimentolu betonların H₂SO₄ atağına karşı gösterdikleri zayıf dayanıklılık, beton içerisindeki serbest kirecin ve büyük boşlukların varlığından ileri gelmekte olup, asit atağına karşı %40 uçucu kül içeren betonlarda erken yaşlarda görülen zayıf dayanıklılık ise, hidrate olmamış çok sayıdaki uçucu kül tanelerin bulunmasından ve çimento hamurunun boşluklu olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu betonlarda, hidratasyon sonucu meydana gelen C-S-H jeli miktarı, Portland çimentolu veya uçucu kül ve cüruf katkılı betonlardaki C-S-H miktarından daha azdır.

2.2.3.8. Alkali – Agregası Reaksiyonu

Öğütölmüş yüksek fırın cürufunun, çimentonun bir bölümü ile yer değiştirilerek kullanılması, alkali miktarını azaltabilir. Alkali-silika reaksiyonundan ileri gelen hasar riskini azaltmak için önerilen çok sayıda alternatif çözüm vardır. Bunlar, i) betonun alkali içeriğinin sınırlandırılması, ii) öğütölmüş yüksek fırın cürufu veya uçucu kül kullanımını, iii) düşük alkalili çimento kullanımını, iv) reaktif olmayan agregası kullanımını içerir (RMC, 1991 : Taşdemir ve ark., 2000).

Kwon (2005), çimento dozajı yaklaşık 500 kg/m³ civarında olan yüksek dayanımlı betonlar üzerinde yaptığı çalışmasında, alkali-agregası reaksiyonu için yüksek dayanımlı betonda bulunan fazla miktardaki alkali muhtevasının bir dezavantaj olduğunu, kimyasal metotlar ve harçlar sayesinde reaktif olmadığına karar verilen agregasının kullanılmasıyla birlikte betonda zararlı hacim genleşmelerinin gözlenmediğini bildirmiştir. Öte yandan, betonda düşük alkalili çimento kullanımının ya da öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufunun %30 oranında çimento ile yer değiştirmeye uğratılmasının alkali-agregası reaksiyonunun neden olacağı

şışmeleri önleyeceğini, %30 ikame oranına göre betonun alkali içeriğinde yaklaşık olarak 1.0 ila 1.7 kg/m³ civarında bir azalma gözlemlendiğini ve son olarak artan cüruf inceliğinin alkali-agrega reaksiyonunu önlemede etkili olduğunu rapor etmiştir.

Yüksek miktarda alkali içeren bir Portland çimentosunun, granüle yüksek fırın cürufuyla %24 ve %50 oranlarında yer değiştirilmesi neticesinde, ikame oranının artmasıyla birlikte betonda yer alan alkali agrega reaksiyonunun meydana getirdiği genleşmelerde de bir azalma olduğu kaydedilmiştir (Regourd, 1986).

Bijen (1996)'e göre, cüruflar, betonun klorür geçirgenliğini azaltarak en agresif çevre koşullarına maruz yapılarıdaki betonarme demirlerinin korozyonunu başka hiçbir tedbire gerek kalmadan önlemekte, ilaveten, zararlı hacim genleşmeleri meydana getiren sülfata atığına ve alkali-agrega reaksiyonuna karşı da direnç sağlamaktadır.

Portland çimentosunun puzolanik malzemelerle kısmi olarak yer değişmesi, alkali-agrega reaksiyonu sonucu meydana gelen zararlı hacim genleşmelerini kontrol etmede etkili olmaktadır. Bu malzemeler, boşluk çözeltisinin pH seviyesini düşürmek suretiyle, çimento hamurundaki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerler. Aynı zamanda, betonun geçirgenliğini ve boşlukluluğunu etkili bir şekilde azaltmak suretiyle, reaktif silis içeren agregayı, kimyasal olarak reaksiyona girip birbirlerini etkilememesi için, çimento hamurundaki alkalilere karşı izole ederler (Nawy, 2001).

2.2.3.9. Kılcal Su Emme

Sorptivite ya da bir başka deyişle kılcallık, kapiler harekete bağlı olarak betona su giriş hızını tanımlayan bir özelliktir. Beton kalitesi, zararlı çözünür maddelerin girişi ile düşmekte ve dayanıklılık azalmaktadır. Bundan dolayı beton kalitesi, betonun performans kriterlerinden olan sorptivite ile ters orantılıdır.

Beton içerisindeki Portland çimentosunun granüle yüksek fırın cürufuyla kısmen ikame edilmesi sonucu elde edilen betonların kılcal su emme değerleri önemli ölçüde azalmakta olup, bu nitelik özellikle ıslanma-kurumaya maruz betonlar için önemlidir (Akman, 1992; Onat, 1998).

Beton basınç mukavemetinin artmasıyla kılcal su emme katsayısının da azaldığını bildiren Taşdemir (2003), betonun kılcal su emme katsayısının kür şartlarına karşı oldukça hassas olduğunu, en düşük kılcal su emme katsayılarının 28 gün süresince 20°C’de kirece doymuş su küründe bekletilen numunelerden elde edildiğini rapor etmiştir.

Su/bağlayıcı oranı-basınç mukavemeti ve su/bağlayıcı oranı-kapilarite katsayısı arasında bir ilişki olduğunu, artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte basınç mukavemetinde bir azalma, kapilarite katsayısında bir artma meydana geldiğini bildiren Türkmen (2003), su/bağlayıcı oranı-basınç mukavemeti ve su/bağlayıcı oranı-görünen porozite arasında da benzer bir ilişki olduğunu, artan su/bağlayıcı oranının basınç mukavemetinde bir azalma ve görünen porozitede bir artma meydana getirdiğini belirtmiştir. Araştırma sonucuna göre, kapilarite katsayısı ile görünen porozite arasında lineer bir etki olduğu, yükselen kapilarite katsayısı ile birlikte görünen porozitede de bir artma meydana geldiği rapor edilmiştir.

Yaşla birlikte kılcallıkta da bir azalma olduğunu bildiren Dias (2000), karbonatlaşmaya uğramış beton yüzeylerinde görülen kılcallığın beton içerisindeki kılcallıktan daha az olduğunu ve yüzey karbonatlaşmasından dolayı kılcallığın da zamanla azaldığını bildirmiştir. Meydana gelen karbonatlaşmanın, zayıf kür edilmiş beton yüzeylerinde ve bazı durumlardaki beton durabilitesi üzerinde telafi edici bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir.

2.2.3.10. Boşluk Yapısı

Betonun mikro yapısal özellikleri doğrudan dayanımını ve durabilitesini etkilemektedir. Betonun dayanımı haricinde geçirimsizlik, betonun potansiyel durabilitesinin en iyi göstergesidir. Beton geçirgen olduğu takdirde, zararlı maddeler, betonun içerisine girerek, betonarme demirinin korozyonunu meydana getiren sülfat tesiri, karbonatlaşma ve klorürün nüfuzuna neden olmaktadır. Uygun çimento tipi ve içeriği, düşük su-çimento oranı, taze betonun uygun sıkıştırılması ve bakımı, betonun geçirimsizliğine katkısı olan faktörler arasında yer almaktadır (Hooton, 1993; Özcan, 2005).

Taşdemir ve ark. (2000), öğütülmüş yüksek fırın cürufu inceliğinin betonun özelliklerine ve mikro yapısına etkisi ile ilgili olarak yaptıkları çalışmalarında, yüksek incelikli öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren betonlarda ara yüzeyin daha homojen ve yoğun olduğunu, buna bağlı olarak da, agrega-çimento hamuru temas yüzeyindeki bağlantının daha kuvvetli olduğunu bildirmişlerdir.

Normal Portland çimentolu betonların öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren betonlara göre daha yüksek toplam boşluk hacmine ve daha büyük boşluklara sahip olduğunu bildiren Nakamura ve ark. (1992)'na göre, cüruf katkılı betonlar daha küçük çapta boşluklara sahip olup, artan cüruf inceliği ile birlikte toplam boşluk hacmi de azalmaktadır.

Doğulu (1998)'nun bildirdiğine göre Shi-Ping ve Grandet (1989), cüruf lu çimento içeren harçların boşluk yapılarını, Portland çimentosu ile yapılmış harçların boşluk yapıları ile kıyaslamalı olarak araştırıp, toplam boşlukluluk, boşluk çapı dağılımı, yüzey alanı ve özellikle çapı 500 A'den daha büyük boşlukların hacimleri gibi porozite karakteristiklerini belirlemişlerdir. Deney sonuçları, hidrasyonun devam etmesiyle harçların porozitelerinde meydana gelen azalmanın, daha küçük boşlukların (37 A–500 A) hacimlerinin kısmen aynı kalmasına rağmen, daha büyük boşluk hacimlerinin azalmasıyla ortaya çıktığını göstermiştir. Daha büyük boşlukların hacimlerinde meydana gelen bu azalma, cüruf katkılı harçlar için Portland çimentolu harçlara göre daha önemli olmaktadır.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun en büyük yararı betonun durabilitesinde meydana gelen belirgin iyileşmedir. Hidrate olmuş cüruf içeren betonun yapısında, Portland çimentosu betonuna göre daha fazla jel boşluğu ve daha az kapiler boşluk bulunmaktadır (Reeves, 1986).

Uçucu kül ve cüruf katkılı çimentoların özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada, farklı oranlardaki cüruf, uçucu kül ve klinker içeren karışımların %5 gibi çok az miktarda alçıyla öğütülmesi ile ürettikleri çimentolardan 40x40x160 mm ebadında harçlar hazırlayan Dongxu ve ark. (2000), bu karışımlarından elde ettikleri sonuçlara göre, ağırlıkça %30 cüruf ve %20 uçucu kül gibi bir oran seçilmesi durumunda %45 klinker içeren karışımların, mukavemet ve boşluk yapısı açısından

oldukça iyi sonuçlar verdiğini, bunun da uçucu kül ve cüruf katkılarının çimento hamuruna sağladıkları dolgu etkisinden ileri geldiğini bildirmişlerdir.

Granüle yüksek fırın cürufllu betonların klorür geçirgenliğinin ve bağlayıcılığının araştırıldığı bir çalışmada Luo ve ark. (2003), granüle yüksek fırın cürufllu betonların kaba boşluklarının daha az olduğunu ve normal Portland çimentolu betonların boşluk yapısının, %70 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun eklenmesi durumunda özellikle 60 günlük zaman diliminin ardından oldukça iyileştiğini bildirmiştir. Öte yandan, sülfatlar ve C_3A arasındaki şişme reaksiyonları dışındaki diğer bazı nedenlerden dolayı, sülfatların betonun boşluk yapısını beklenildiği gibi olumsuz etkilediği, bu nedenle de sülfatlarla granüle yüksek fırın cürufllu betonların boşluk yapısının geliştirileceğinin doğru olmadığı rapor edilmiştir.

Portland çimentosu ile birlikte kullanıldıklarında, mineral katkı maddelerinin beton bünyesindeki iri boşlukları küçültebilme ve betonun geçirgenliğini azaltabilme kabiliyetleri en önemli özellikleridir. Sevim (2003)'in bildirdiğine göre Cabrera (1985), puzolanların beton geçirgenliğini indirgemedede çok etkili olduklarına işaret etmiştir.

Çimento hamurunun toplam boşlukluluğu üzerinde cüruf miktarının etkisine yönelik olarak elde edilen deneysel veriler, cüruf miktarındaki artışla birlikte porozite de bir azalma olduğunu ortaya koymaktadır. Gerçekten de porozitedeki bu olumlu etki cüruf katkılı Portland çimentoları ile yapılan betonların iyileşen durabilitesini açıklamaktadır. Aslında, porozitede böyle bir azalma her zaman gözlenmez ve fazla miktarlardaki granüle yüksek fırın cürufllarının ilavesi ile azalmadan ziyade toplam boşluk hacminde bir artış görülür. Bu yüzden, cüruf katkılı betonların artan durabilitesi ve azalan permeabilitesi, poroziteden ziyade ortaya çıkan daha ince boşluk sistemleri ile ilişkilidir (Soroka, 1993).

Bijen (1996)'e göre, uçucu küllü veya granüle yüksek fırın cürufllu betonların boşluk çapı dağılımı esasen normal Portland çimentolu betonlarınkinden daha incedir. Yüksek fırın cürufllu çimento için, boşluk çapı dağılımı başlangıçta daha kaba yapılı olmasına karşın, sonraları jel miktarının artmasından dolayı daha da inceleşmekte ve esas olarak toplam boşlukluluk değişmemektedir. Bir başka deyişle,

porozitede fazla bir değişim olmamasına rağmen, toplam boşluk dağılımı gittikçe daha ince olmakta ve daha küçük boşlukların miktarı giderek artmaktadır. Öte yandan, mineral katkıların agrega ve çimento hamuru ya da donatı ve çimento hamuru arasındaki geçiş bölgesi üzerine de büyük bir etkisi vardır. Boşluklu ara yüzey bölgesi 40 μm 'ye kadar varmakta olup, çimento hamurunun yaklaşık olarak %20'si ila %30'unu kaplamaktadır. Beton içerisinde uçucu kül ya da granüle yüksek fırın cürufunun kullanılması durumunda, bu geçiş bölgesinin kalınlığı oldukça azalmakta olup, bu azalmanın muhtemel sebebi, daha ince katı malzemelerin oluşturduğu boşluk doldurma etkisidir.

Zhang ve ark. (2004), iki ayrı inceliğe sahip yüksek fırın cürufunu, Portland çimentosuyla %50 oranında yer değişime uğratmak suretiyle ürettikleri iki farklı karışımdan 80x20x20 mm ebadında numuneler hazırlamışlardır. Araştırmacılar, numuneler üzerinde yürüttükleri cıvalı porozimetre deneyinin sonuçlarına göre, karbonatlaşma öncesinde, 7.5'ten 7500 nm'ye kadar değişen büyüklüklerdeki boşluk hacminin, 8380 cm^2/gr özgül yüzey alanına sahip çok ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu beton (S_1) için 0.067 $\text{cm}^3/\text{g}^{-1}$, 3460 cm^2/gr özgül yüzey alanına sahip normal incelikte öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren beton (S_2) için de 0.144 $\text{cm}^3/\text{g}^{-1}$ olduğunu bildirmişlerdir. Bu durum, S_1 betonundaki çimento hamurunun S_2 'ye göre daha yoğun olduğunu göstermektedir. 3 günlük karbonatlaşmanın ardından S_1 'in boşluk hacmi, karbonatlaşma öncesindeki ile aynı gibi olup, 3. günde S_1 'in boşluk çapı dağılımında çok az bir değişim gözlenmiştir. Bu, sertleşmiş bağlayıcı madde hamurundaki karbonatlaşmanın S_1 'in boşluk yapısı üzerinde çok az etkisi olduğuna işaret etmektedir. 3. günde S_2 'nin içerisinde bulunan daha ince boşlukların hacmi 0.101 $\text{cm}^3/\text{g}^{-1}$ 'e düşerken, daha büyük boşlukların hacmi oldukça artmıştır. S_2 betonu için maksimum boşluk çapı muhtemel olarak karbonatlaşma öncesinde 0.07 μm iken, 3 günlük karbonatlaşmanın ardından 0.1 μm 'ye ulaşmaktadır ki bu da, karbonatlaşmadan dolayı, S_2 'nin boşluk çapının daha kaba olduğunu göstermektedir.

2.2.4. Kürün Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonlar Üzerindeki Etkisi

Uygulanan kürün sıcaklığı, süresi ve şartları özellikle puzolan katkılı çimentoların gelişiminde önemli rol oynamaktadır. Bu tür çimentolar yetersiz kürden katkısız çimentolara göre daha fazla etkilenmektedir (Özer, 2000).

Yüksek fırın cürufu içeren karışımların erken yaşlardaki mukavemet gelişimleri büyük ölçüde kür sıcaklığına bağlıdır. Standard kür şartları altında, yüksek fırın cürufu harçlar, Portland çimentolu harçlara göre daha düşük hızda mukavemet kazanır. Ancak, yüksek sıcaklıklardaki mukavemet kazanımı çok daha hızlıdır ve erken yaştaki mukavemet gelişimi yüksek ikame oranlarındaki cüruf katkılı karışımlar için daha önemli olmaktadır (Barnett ve ark., 2006).

Ramezaniapour ve Malhotra (1995), üç farklı çimento dozajı ve üç ayrı su/bağlayıcı oranında hazırlanan, ağırlıkça %0'dan % 80'e kadar değişen oranlarda cüruf içeren betonlar için, ikame oranının ve kür şartlarının beton basınç mukavemeti üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmalarında, cüruf ya da uçucu kül içeren betonların mukavemetlerinin, kontrol betonlarına kıyasla, kür şartlarına karşı daha hassas olduğunu ve bu tip betonların daha iyi kür edilmeleri gerektiğini rapor etmişlerdir.

Cüruf ya da uçucu kül içeren betonların hidratasyonu aynı 28 günlük eşdeğer mukavemete sahip Portland çimentolu betonların hidratasyonundan daha yavaştır. Bu yüzden cüruf içeren betonlar, Portland çimentolu betonlara göre, daha uzun süreli küre tabi tutulmalıdır. Bu husus göz önüne alındığında ve benzer Portland çimentolu beton ile aynı olgunluktaiken küre son verilmesi durumunda, herhangi bir olumsuz etki görülmez. Aksi takdirde, geçirgenliği yüksek ve dayanımı daha düşük bir beton elde edilir. Genellikle, agresif çevre koşullarına maruz cüruf katkılı betonların kuru kür şartlarından daha az etkilenmesini sağlamak için, daha düşük su/bağlayıcı oranlı kompozisyonlar kullanılmaktadır (Bijen, 1996).

Betona cüruf katılması, hidratasyon sonucu oluşan serbest kirecin bağlayıcı özelliğe sahip ilave kalsiyum silikat hidrate'ye dönüşmesini sağladığından, taze veya sertleşmiş betonun dayanım ve durabilite özelliklerini iyileştirmekte, betonu hiç cüruf içermeyen normal bir betona kıyasla agresif çevre koşullarına karşı daha

dayanıklı kılmaktadır. Bugüne kadarki yapılan çalışmalar, cüruf katkısının, korozyon dayanıklılığı, durabilite, geçirgenlik, işlenebilirlik ve mukavemet gibi beton karakteristiklerini geliştirdiğini göstermektedir (Babu ve Kumar, 2000). Ancak bu olumlu etkilerin yanı sıra, soğuk havalarda yüksek fırın cürufunun betonda kullanılması, betonda daha geç priz alma gibi olumsuz etkilere neden olacağından bu konuda dikkatli olmak gerekmektedir (Erdoğan, 2003).

Berktaş (1991), normal betonların aksine, yüksek performanslı betonların üst yüzeylerinde terleme görülmediğini, bu nedenle betonun erken kurummasına ve plastik rötre çatlaklarına engel olmak için bu tip betonların daha özenli bakıma gereksinim duyduğunu bildirmiştir.

Al-Kaisi (1989), 40 ve 60°C’de kür edilen betonlara göre, 20°C’de kür edilmiş Portland çimentolu ve cüruf katkılı betonların 28 günden sonra daha fazla dayanım geliştirdiğini belirtmiştir.

Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde farklı kür şartlarının etkisi ile ilgili olarak bir çalışma yapan Türkmen (2003), silis dumanı ve yüksek fırın cürufu betonların mukavemet gelişimlerinin kür derecesine ve kür süresine bağlı olduğunu, Portland çimentosu ile kıyaslandığında, beton içerisinde çok ince silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kullanımının, numunelerin mekanik özelliklerini ve durabilitesini arttırdığını bildirmiştir.

Yüksek performanslı betonların otogen (kendi yapısından kaynaklanan) deformasyonları üzerinde çimento tipinin ve farklı kür sıcaklığının etkisi ile ilgili olarak yapılan bir çalışmada Lura ve ark. (2001), 0.35 su/bağlayıcı oranında üç farklı çimento tipi (Portland çimentosu, yüksek fırın cürufu çimento ve ikisinin yarı yarıya birlikte kullanıldığı çimento) ile hazırlanan ve 10, 20, 30 ve 40°C gibi dört farklı kür ortamlarında bekletilen betonların yüksek sıcaklıklarda, erken dönem mukavemetinin arttığını, ancak, bu yüksek kür sıcaklığının ilerleyen yaşlardaki mukavemette bir düşüş meydana getirdiğini bildirmişlerdir.

Aynı su/bağlayıcı oranında hazırlanmış ve 5, 20 ve 30°C gibi üç farklı sıcaklıktaki suda kür edilmiş biri Portland çimentolu diğeri de %50 cüruf katkılı iki farklı betonun üzerinde yapılan araştırma sonuçlarına göre, 5°C’de kür edilen cüruf

katkılı betonun, Portland çimentolu betona göre daha yavaş dayanım geliştirdiği fakat 30°C’de bu durumun tam tersi olduğu ortaya çıkmıştır (Pratas, 1978).

Cüruf katkılı betonların özellikle soğuk hava şartlarında daha uzun kür sürelerine ihtiyaç duyması, durabilitenin potansiyel bir problem olarak görüldüğü yerlerde ve yapı elemanlarının ince kısımlarındaki betonlarda cüruf kullanılması durumunda dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur (Newman ve Choo, 2003).

2.2.5. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cüruflarının Beton Teknolojisinde Kullanılması

Alkalilerle aktive edilmiş cürufli 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).

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

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

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).

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.

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).

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).

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).

Değişik modül ve konsantrasyonlarda farklı aktivatörler kullanmak suretiyle, öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının alkalilerle aktive edilmesi üzerine yapılan bir araştırmada, cürufli 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 kısaltmakta 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 cürufli çimentoların Portland çimentolarına göre daha yüksek son mukavemet gösterdiğini bildirmiştir.

Jimenez ve ark. (1999), cürufların aktivasyonunda kullanılan alkali aktivatör yapısının çok önemli olduğunu bildirerek, elde ettikleri mukavemet değerlerine göre kullanılan aktivatörleri $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH} \gg \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaOH}$ 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 cürufli 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 cürufli 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.

Kutti ve ark. (1992), NaOH ile aktive edilmiş cüruflu harçlardan, 20°C ve %33 bağıl nem altında kür edilenlerin, 20°C 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 ısısidir. 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).

Palacios ve Puertas (2005), NaOH ile aktive edilmiş cüruf lu harçların eğilmede çekme ve basınç mukavemeti değerlerinin hem Portland çimentolu hem de camsuyu ile aktive edilmiş cüruf lu harçlarından çok daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. %4 Na₂O içeriğine sahip cam suyu ile aktive edilmiş cüruf lu harçların mukavemetleri, tüm kür yaşlarında Portland çimentolu harçlardan elde edilen değerlerden düşük olmuştur. Öte yandan, %5 Na₂O içeriğine sahip cam suyu ile aktive edilmiş cüruf lu harçların mukavemetleri ise, 2 günlük kürün ardından, Portland çimentosu içeren harçlarından düşük olmasına rağmen, %4 Na₂O içeriğine sahip cam suyu ile aktive edilmiş cüruf lu 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 cüruf lu betonlarda kullanım için $M_s=0.75$ ve %4 Na konsantrasyonlu sodyum silikat çözeltisini önermişlerdir.

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

Alkalilerle aktive edilmiş cüruf lu hamurların başlangıç ve bitiş priz zamanları portland çimentolu hamurlarından çok daha kısadır (Collins ve Sanjayan, 1998; Bakharev ve ark., 1999; Palacios ve Puertas, 2005).

Alkali aktive edilmiş cüruf lu 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 çökmesine 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 Na₂CO₃ olduğunda ise, cürufun Ca²⁺ iyonları, aktivatörün CO₃²⁻ 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-cürufllu 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 ısını arttırmaktadır.

Sodyum silikat ile alkali aktive edilmiş cürufllu 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).

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 cürufllu iri agreganın, normal ağırlıklı iri agrega ile yer değiştirilmesiyle elde ettikleri alkali ile aktive edilmiş cürufllu 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.

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 cüruf betonlar ve Na_2CO_3 +NaOH kombinasyonu ile 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 cüruf çimentoların kuruma rötreleri, Portland çimentosunununkinden oldukça fazla olup cam suyu ile aktive edilmiş cüruf çimentolarda, cam suyu dozajının artmasıyla ya da yükselen n modülüyle daha yüksek değerler almaktadır.

Bakharev ve ark. (1999), sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak hazırladıkları alkali aktiviteli cüruf betonlara uygulanan sıcak kürün, normal Portland çimentolu betonlarıncıyla 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 cüruf betonlardaki orta ölçekli boşlukların normal Portland çimentolu betonlara göre daha fazla olmasından ileri geldiğini belirtmiştir. Alkalilerle aktive edilmiş cüruf 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 cürüflu betonların rötresi için çok önemli bir faktör olmaktadır.

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 cürüflu ve salt Portland çimentolu numunelerin bir yıl sonundaki mikro yapısal değişikliklerini ve basınç mukavemeti gelişimlerini incelemişlerdir. Sodyum sülfat çözeltilisinde 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 çözeltilisinde 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 cürüflu betonlarda bu yalnızca alçı olmaktadır.

Bakharev ve ark. (2001), alkalilerle aktive edilmiş cürüflu 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.

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 duyarlıdır. 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 cüruflı 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 cüruflı betonlar üzerindeki etkilerini araştıran Bakharev ve ark. (2000), cüruflı 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 uygun olduğunu bildirmişlerdir.

Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu betonlarda donma çözülme sonrası ağırlık kayıpları normal Portland çimentolu betonun donma çözülme sonrası ağırlık kayıplarına yakın olarak bulunmuştur. Donma çözülme direncini arttırmak için kullanılan hava sürükleyici katkıların alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu betonlar üzerinde olumsuz etkisinin olmadığı görülmüştür. Hava sürüklemeye sonucunda normal Portland çimentolu betonda olduğu gibi donma çözülme direnci ve işlenebilirlik artmıştır (Shi ve Day, 1996).

3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, beton ve harç karışımlarında kullanılan malzemelerin miktarları, hazırlanan numune boyutları ve bu numuneler üzerinde yürütülen deneyler hakkında bilgi verilmektedir.

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Çimento

Bu çalışmada kullanılan çimento, TS EN 197-1 (2002) ile uyumlu normal Portland çimentosu (PÇ 42.5) olup, Adana Çimento Sanayi tarafından üretilmiştir. Çimentonun taze olarak kullanılmasına özen gösterilip, nem alarak topaklaşma göstermemesi için de çimento, özel koruyucu kaplar içerisinde muhafaza edilmiştir. Kullanılan PÇ 42.5 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 ₂ O ₃	5.20
Fe ₂ O ₃	3.73
CaO	62.91
MgO	2.54
SO ₃	2.72
Kızdırma Kaybı	0.96
Na ₂ O	0.25
K ₂ O	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 (cm ² /gr)	3250
	0.200 mm elekte kalıntı (%)	0.0
	0.090 mm elekte kalıntı (%)	0.1

3.1.2. Yüksek Fırın Cürufu

Çalışmada, İskenderun Demir Çelik Fabrikası'nın atığı olan ve OYSA İskenderun Çimento Fabrikası'nda belli bir incelik değerine kadar öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Cürufun kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Cürufun baziklik katsayısı $K_b = (CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3) = 0.84$ olup, cüruf özgül ağırlığı 2.81 gr/cm³, Blaine özgül yüzeyi ise 4250 cm²/gr'dır.

Çizelge 3.3. Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu (%)

Kimyasal Analiz	Analiz Sonuçları (%)
SiO ₂	36.70
Al ₂ O ₃	14.21
Fe ₂ O ₃	0.98
CaO	32.61
MgO	10.12
SO ₃	0.99
Kızdırma Kaybı	-
Na ₂ O	0.42
K ₂ O	0.76

3.1.3. Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

Taze beton ve harç karışımlarında işlenebilirliği sağlamak amacıyla, erken yüksek mukavemet, mükemmel yüzey görünümü ve nihai yüksek performansa

gereksinim duyulan, prefabrik beton ve hazır beton endüstrisi için geliştirilmiş, yüksek oranda su ihtiyacını azaltan, klor içermeyen yeni nesil YKS Glenium 51 hiperakışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan hiperakışkanlaştırıcı, polikarboksilik eter esaslı olup, 20°C deki yoğunluğu 1.01–1.07 kg/dm³'tür.

3.1.4. Su

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

3.1.5. Aktivatörler

Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu harçlarda, çimentonun değişen yüzdeleri ile yer değişime uğratılarak kullanılan yüksek fırın cüruflarının aktivasyonu, sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na₂CO₃), sodyum silikat çözeltisi ya da diğer adıyla cam suyu [Na₂O(*n*)SiO₂] gibi kimyasal maddelerle yapılmış olup, bu şekilde üretilen harçlar üzerinde de mekanik ve dayanıklılık deneyleri yürütülmüştür. MERCK kimyasallarından temin edilen NaOH ve Na₂CO₃ için molekül ağırlıkları sırasıyla 40 gr/mol ve 105.99 gr/mol olup, kimyasal özellikleri Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.4. Sodyum hidroksitin kimyasal kompozisyonu (%)

Asidimetrik	≥ 97
Na ₂ CO ₃	≤ 1
Cl	≤ 0.01
SO ₄	≤ 0.01
Pb	≤ 0.002
Al	≤ 0.002
Fe	≤ 0.002

Çizelge 3.5. Sodyum karbonatın kimyasal kompozisyonu (%)

Asidimetrik	≥ 99.9
Cl	≤ 0.002
PO ₄	≤ 0.001
SiO ₂	≤ 0.002
SO ₄	≤ 0.005
N	≤ 0.001
Pb	≤ 0.0005
Al	≤ 0.001
Ca	≤ 0.005
Fe	≤ 0.0005
K	≤ 0.01
Mg	≤ 0.0005
K.K. (300°C)	≤ 1.0

Şişecam Soda Sanayi A.Ş. Mersin Soda Fabrikası'ndan temin edilen 2 Modül 38–40 Bé sodyum silikat çözeltisi için kimyasal değerler ise $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=2$, $\%\text{Na}_2\text{O}=11.2$, $\%\text{SiO}_2=22.4$ olarak verilmiştir.

3.1.6. Agrega

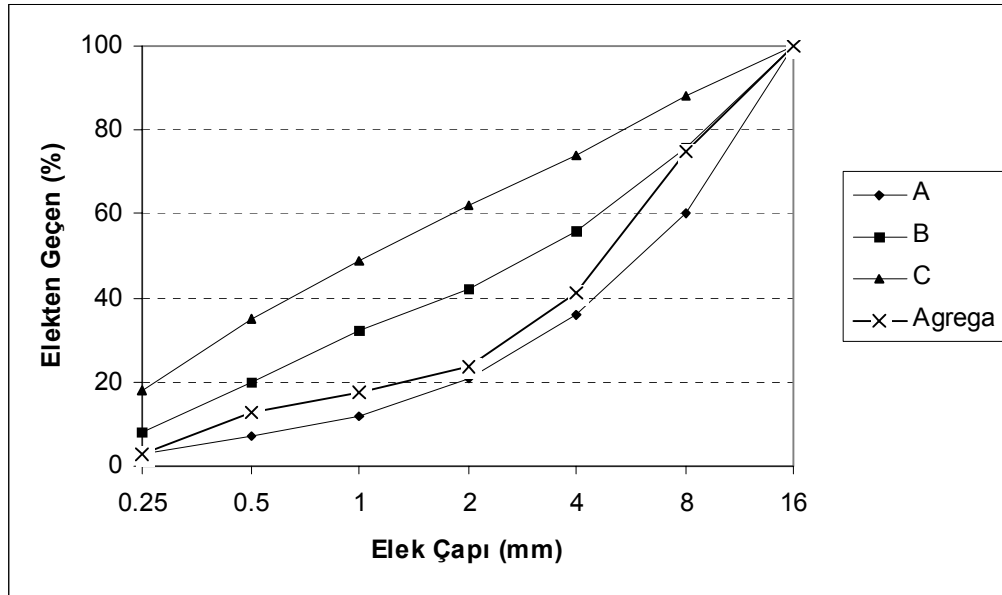
3.1.6.1. Beton Üretiminde Kullanılan Agregalar

Deneyssel çalışmalarda DSİ VI. Bölge Müdürlüğü Kanalet Üretim Fabrikası agrega tesislerinden alınan Çakıt Deresi doğal agregası kullanılmıştır.

Beton karışımlarında kullanılan agreganın maksimum tane çapı 16 mm olup, yıkanmış ve etüvde kurutulduktan sonra kullanılmıştır. Agreganın su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı TS 3526 (1980)'ya göre bulunmuş olup, ince ve iri agreganın kuru yüzey doygun özgül ağırlıkları sırasıyla 2.67 ve 2.70 gr/cm³'tür. İnce ve iri agreganın su emme kapasiteleri %1.20 ve %1.14'tür. Karışımda kullanılan agreganın eleklerden geçen yüzde değerleri ve granülometri eğrisi, Çizelge 3.6 ve Şekil 3.1'de sunulmuştur. Agrega granülometrisi standarda uygundur (TS 706, 1980).

Çizelge 3.6. Karışık agreg granülometrisi ve TS 706 standart sınırları

Elek Açıklığı (mm)	Alt Sınır (A)	Orta Sınır (B)	Üst Sınır (C)	Agrega Granülometrisi
16	100	100	100	100
8	60	76	88	74.7
4	36	56	74	41.0
2	21	42	62	23.7
1	12	32	49	17.4
0.5	7	20	35	12.9
0.25	3	8	18	3.0

**Şekil 3.1.** Beton karışımlarda kullanılan agreganın granülometri eğrisi

3.1.6.2. Harç Üretiminde Kullanılan İnce Agreg

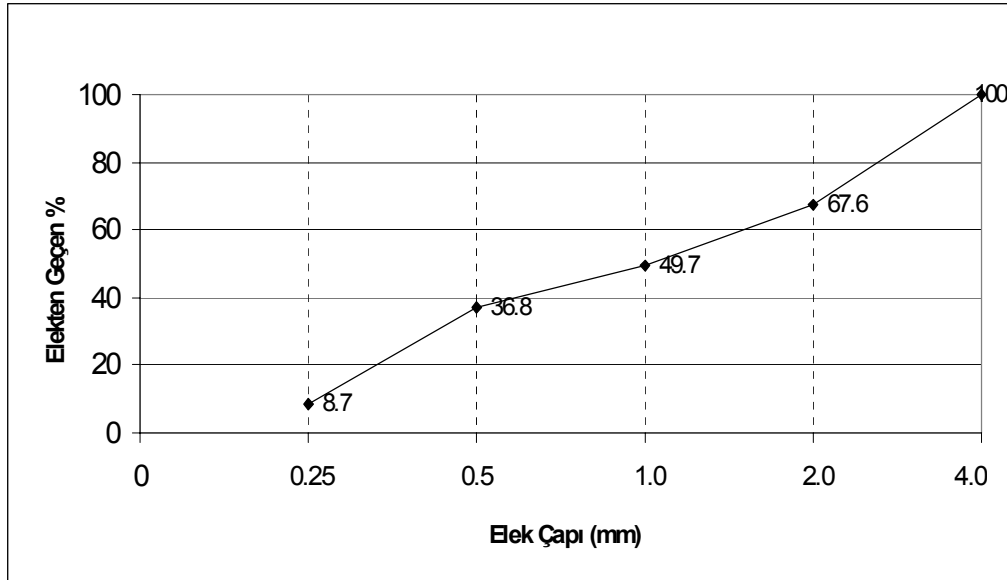
Harç numunelerin hazırlanmasında yıkanmış ve kurutulmuş temiz kum kullanılmış olup, bu kuma ait fiziksel özellikler de Çizelge 3.7'de sunulmaktadır. Aynı zamanda, kuma ait elek analizi sonuçları ise Çizelge 3.8 ve Şekil 3.2'de verilmiştir. Kumun beton ve harç üretiminde kullanılması uygundur (TS 706, 1980).

Çizelge 3.7. Harç numunelerde kullanılan kuma ait fiziksel özellikler

Fiziksel Özellik	Değeri (gr/cm ³)
γ_{kuru}	2.64
γ_{dky}	2.67
$\gamma_{\text{görünen}}$	2.73
Su Emme(%)	1.20

Çizelge 3.8. Harç numunelerde kullanılan kuma ait elek analizi sonuçları

Elek no	Elek üzerinde kalan (gr)	Elek üstünde kalan yığılımlı miktar (%)	Elekten geçen (gr)	Elekten geçen miktar (%)
4	0	0	2500	100
2	810	32.4	1690	67.6
1	446.7	50.3	1243.33	49.7
0.5	323.3	63.2	920	36.8
0.25	703.3	91.3	216.67	8.7
Tava	216.7	100	0	0
Toplam	2500			

**Şekil 3.2.** Harç numunelerde kullanılan kuma ait elek analizi grafiği

3.2. Cüruf Aktivite İndeksi

ASTM C 989 (1994) Standardı'na uygun olarak 5 cm'lik küpler ile yapılan cürüflu çimentolu harçlara ait ortalama basınç mukavemetleri her bir yaş için beş değer ortalama alınarak, 7. günde 24.9 MPa, 28. günde ise 48.7 MPa'dır. Referans çimentosu ile hazırlanmış harç küplerinin ortalama basınç mukavemetleri 7. günde 43.6 MPa, 28. günde ise 57.6 MPa olarak bulunmuştur. Aktivite indeksleri ise 7. gün için %57 ve 28. gün için de %85 bulunmuş olup, karışımlarda kullanılan cürufun kategori 80 sınıfında olduğu kanaati ortaya çıkmıştır. Cüruf inceliğinin, yükselmesi durumunda, aktivite indeksinin de artışına bağlı olarak, cürufun bir diğer üst kategorilerde yer alabileceği düşünülmüştür.

3.3. Beton Karışım Oranları

Çalışmada, 350, 400 ve 450 kg/m³ çimento dozajı ve 0.30, 0.40 ve 0.50 gibi üç ayrı su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan beton karışımları için sırası ile %0 (kontrol betonu), %20, %40, %60 ve %80 oranlarında cüruf yer değişimi yapılarak birbirinden farklı 45 beton karışımı elde edilmiştir. Karışım miktarlarının hesabı TS 802 (1985)'de verilen mutlak hacim metoduna göre yapılmış olup, hapsolmuş hava miktarı için yine TS 802 (1985)'den yararlanılmıştır.

Taze betonların işlenebilirliklerini düzenlemek amacıyla karışımlara koyulacak kimyasal katkı miktarı, yapılan sarsma tablası deneylerine göre betonun 45 ± 5 cm yayılmasını sağlayacak şekilde belirlenmiş ve çimento dozajının yüzdesi olarak değişen oranlarda kullanılmıştır.

Beton karışımlarının üretiminde, iri ve ince agrega bir süre kuru olarak karıştırılmış, üzerine çimento ve cüruf ilave edilerek biraz daha karıştırılmış ve en son olarak da hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi karışım suyu içerisinde karışım dahil edilmiştir.

1 m³ beton karışımı için ihtiyaç duyulan yaklaşık malzeme miktarları Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Bir metreküp beton karışımı için gerekli yaklaşık malzeme miktarları

Karışım	Ç (kg/m ³)	YFC (kg/m ³)	S (lt/m ³)	H.A (kg/m ³)	Agrega (kg/m ³)
K350-0.3-00	350	-	105	12.25	2030
K350-0.3-20	280	70	105	11.55	2025
K350-0.3-40	210	140	105	8.75	2015
K350-0.3-60	140	210	105	7.00	2010
K350-0.3-80	70	280	105	5.60	2000
K350-0.4-00	350	-	140	5.25	1940
K350-0.4-20	280	70	140	4.20	1930
K350-0.4-40	210	140	140	3.50	1925
K350-0.4-60	140	210	140	1.75	1915
K350-0.4-80	70	280	140	2.80	1910
K350-0.5-00	350	-	175	0.70	1845
K350-0.5-20	280	70	175	-	1840
K350-0.5-40	210	140	175	-	1830
K350-0.5-60	140	210	175	-	1825
K350-0.5-80	70	280	175	-	1815
K400-0.3-00	400	-	120	16.00	1950
K400-0.3-20	320	80	120	14.00	1940
K400-0.3-40	240	160	120	9.60	1935
K400-0.3-60	160	240	120	6.00	1925
K400-0.3-80	80	320	120	4.80	1915
K400-0.4-00	400	-	160	6.00	1845
K400-0.4-20	320	80	160	4.00	1835
K400-0.4-40	240	160	160	4.00	1825
K400-0.4-60	160	240	160	2.40	1820
K400-0.4-80	80	320	160	3.60	1810
K400-0.5-00	400	-	200	0.40	1735
K400-0.5-20	320	80	200	-	1730
K400-0.5-40	240	160	200	-	1720
K400-0.5-60	160	240	200	-	1710
K400-0.5-80	80	320	200	-	1705
K450-0.3-00	450	-	135	18.00	1865
K450-0.3-20	360	90	135	14.40	1860
K450-0.3-40	270	180	135	11.70	1850
K450-0.3-60	180	270	135	9.00	1840
K450-0.3-80	90	360	135	8.10	1830
K450-0.4-00	450	-	180	4.50	1750
K450-0.4-20	360	90	180	3.60	1740
K450-0.4-40	270	180	180	2.25	1730
K450-0.4-60	180	270	180	2.25	1720
K450-0.4-80	90	360	180	1.35	1710
K450-0.5-00	450	-	225	-	1630
K450-0.5-20	360	90	225	-	1620
K450-0.5-40	270	180	225	-	1610
K450-0.5-60	180	270	225	-	1600
K450-0.5-80	90	360	225	-	1590

Hazırlanan karışımlardan elde edilen 150×150×150 mm ebadındaki küp numunelerin bir kısmı, TS EN 12390-2 (2002)'ye uygun olarak, $22 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklığa ve %65 bağıl neme sahip kuru kür odasında 28 ve 90 gün, diğer kısmı ise yine aynı sıcaklıktaki su içerisinde 3, 7, 28, 90 ve 360 gün küre tabi tutulmuştur.

Hazırlanan tüm beton karışımları için taze betonun birim ağırlıkları, hem teorik birim ağırlık hem de pratik birim ağırlık olmak üzere iki şekilde hesaplanmıştır. Teorik birim ağırlıklar, karışım hesaplarında 1 m^3 betonda kullanılan malzemelerin ağırlıkları toplamı ile elde edilmiş olup, pratik birim ağırlıklar ise beton karışımları dökülürken belirlenmiştir. Taze betonların laboratuvardaki dökümleri sırasında ölçülen birim ağırlıkları, $2.35 - 2.55 \text{ kg/dm}^3$, hesap edilen teorik birim ağırlıkları ise $2.27 - 2.50 \text{ kg/dm}^3$ arasında olup, sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

3.4. Harç Karışım Oranları

3.4.1. Yüksek Fırın Cürufllu Harçlar İçin Karışım Oranları

Hazırlanan harç karışımlarının kum/bağlayıcı oranı 2.75 olup, su/bağlayıcı oranları ise sırasıyla 0.30, 0.40 ve 0.50'dir. Yüksek fırın cürufunun, ağırlıkça çimento ile yer değişim oranları da, her bir su/bağlayıcı oranı için %0, %20, %40, %60 ve %80 olarak seçilmiştir.

Düşük su/bağlayıcı oranlarındaki harçlarda işlenebilirliği kolaylaştırmak amacıyla, yapılan yayılma tablası deneylerine göre yayılmanın $20 \pm 1 \text{ cm}$ arasında olmasını sağlayacak şekilde değişen dozajlarda hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

Harç karışımlarının üretimi sırasında, kum, çimento ve cüruf mikser içerisinde bir müddet karıştırılmış, hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi de karışım suyuna katılmak suretiyle bileşime dahil edilmiştir.

Hazırlanan karışımlardan elde edilen 40×40×160 mm ebadındaki prizmatik harç numunelerinin bir kısmı %65 bağıl neme sahip, sıcaklığı $22 \pm 2^\circ\text{C}$ olan kür

odasında, bir kısmı ise aynı sıcaklıktaki su içerisinde deneylerin yapılacağı 7, 28, 90 ve 180. günlere kadar bu iki ayrı ortamda kür edilerek bekletilmiştir.

3.4.2. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufllu Harçlar İçin Karışım Oranları

Çalışmanın bu kısmında, çimento ile çeşitli oranlarda yer değişime uğratarak, sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sıvı sodyum silikat (cam suyu) gibi kimyasal maddelerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu harçların 7, 28, 90 ve 180 günlük dayanım ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir.

Hazırlanan harç karışımlarının kum/bağlayıcı oranı 2.75 olup, su/bağlayıcı oranı ise 0.50'dir. Herhangi bir akışkanlaştırıcı katkının kullanılmadığı karışımlarda, cürufun çimento ile ağırlık bazında yer değişim oranları %20, %40, %60, %80 ve %100 olarak seçilmiş, %4, %6 ve %8 Na⁺ konsantrasyonları ise ağırlıkça cüruf miktarına göre aktivasyonda kullanılacak aktivatör dozajları olarak belirlenmiştir.

Sodyum silikat çözeltisi ile aktivasyonda, çözelti içerisinde 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50 gibi dört ayrı silikat modülü (M_s) elde edebilmek amacıyla sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit farklı oranlarda karıştırılmıştır. Buradaki silikat modülü, çözeltideki ağırlıkça SiO₂/Na₂O oranını göstermektedir.

Harç karışımlarının hazırlanmasında, toz formundaki sodyum karbonat cüruflla birlikte karışıma dahil edilirken, cürufun cam suyu ile aktivasyonunda ise sodyum hidroksit önce karışım suyu içerisinde eritilmiş, sonra da sodyum silikat çözeltisi ile birlikte karıştırılmak suretiyle harç karışımına ilave edilmiştir.

Karışımlarda, 0.50 olan su/bağlayıcı oranını sabit tutabilmek için, çözeltideki su miktarı da göz önüne alınarak, harç karışımlarına eklenecek su miktarlarında da eksiltme yoluyla ayarlamaya gidilmiştir.

Hazırlanan karışımlardan elde edilen 40×40×160 mm ebadında prizmatik harç numuneler, %65 bağıl neme sahip, sıcaklığı 22±2°C olan kür odasında deney günlerine kadar bekletilmiştir.

3.5. DeneySEL Çalışmalar

3.5.1. Beton Numuneler Üzerinde Yürütülen Çalışmalar

-Sarsma Tablası Deneyi: Çalışma kapsamında yer alan her bir çimento dozajında (350, 400 ve 450 kg/m³) ve her bir su/bağlayıcı oranında (0.30, 0.40 ve 0.50) hazırlanmış, %0, %20, %40, %60 ve %80 gibi değişen oranlarda yüksek fırın cürufu ikamesiyle elde edilen taze beton karışımlarına ilave edilecek hiperakışkanlaştırıcı miktarları, betonun 45 ± 5 cm yayılmasını sağlayacak şekilde TS EN 12350–5 (2001)’e uygun olarak sarsma tablası deneyi yardımıyla bulunmuştur.

-Çökme Hunisi (Slump) Deneyi: 350, 400 ve 450 kg/m³ çimento dozajlarında 0.30, 0.40 ve 0.50 gibi üç farklı su/bağlayıcı oranlarında hazırlanmış %0, %20, %40, %60 ve %80 yüksek fırın cürufu ikamesi ile elde edilen taze beton karışımlarının üretimi esnasında TS EN 12350–2 (2002)’e uygun olarak elde edilen çökme miktarları, fikir vermesi açısından sarsma tablası deneyleri ile birlikte sunulmuştur. Betonların slump deneyi sonucunda elde edilen çökme miktarları, 17–24 cm arasında değişmiştir.

-Basınç Mukavemetinin Tayini: Söz konusu çalışma içerisinde 350, 400 ve 450 kg/m³ çimento dozajına sahip beton karışımlarının 3, 7, 28, 90 ve 360 günlük basınç mukavemeti değerleri TS EN 12390–3 (2003)’de belirtilen esaslar doğrultusunda tespit edilmiştir.

-Kür Şartları Değişimi: Değişik cüruf ikame oranlarıyla hazırlanan birbirinden farklı 45 adet karışıma ait beton numunelerinin 28 ve 90 günlük basınç mukavemeti değerleri hem %100 bağıl nemli ortam için hem de %65 bağıl nemli ortam için ayrı ayrı bulunmuştur.

3.5.2. Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Çalışmalar

-Yayılma Tablası Deneyi: Cüruf ikame oranı %0, %20, %40, %60 ve %80 olan 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan taze harç karışımları üzerinde, harç karışımlarının 20 ± 1 cm yayılmasını sağlayacak hiperakışkanlaştırıcı miktarları, TS EN 1015–3 (2000)’e uygun olarak yayılma tablası ölçümleri ile tespit edilmiştir.

-Eğilme-Çekme Mukavemetinin Tayini: Cüruf ikame oranı %0, %20, %40, %60 ve %80 olan 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarında hazırlanmış karışımlardan elde edilen ve iki farklı ortamda kür edilmiş prizmatik harç numuneleri 7, 28, 90 ve 180 günlük zaman dilimlerinde TS EN 1015–11 (2000)'e uygun olarak eğilmede çekme deneyine tabi tutularak eğilmede çekme mukavemeti değerleri bulunmuştur.

-Basınç Mukavemetinin Tayini: Cüruf ikame oranı %0, %20, %40, %60 ve %80 olan 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan karışımlardan elde edilen ve iki ayrı ortamda kür edilmiş sertleşmiş harç numuneleri TS EN 1015–11 (2000) doğrultusunda 7, 28, 90 ve 180 günlük zaman dilimleri için basınç deneyine tabi tutularak basınç mukavemeti değerleri bulunmuştur.

-Aşınma Dayanımının Tayini: Cüruf ikame oranı %0, %20, %40, %60 ve %80 olan 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan harç numuneler 7, 28, 90 ve 180. günlerde Los Angeles deney aletine koyularak her iki kür durumu için aşınmaları bulunmuştur.

-Rötre Tayini: Cüruf ikame oranı %0, %20, %40, %60 ve %80 olan 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan karışımlardan elde edilen 25x25x285 mm ebadındaki numuneler için TS 3453 (1981) doğrultusunda 6 aya kadar rötre değerleri ölçülmüştür.

-Boşluk Oranı ve Su Emme Tayini: Cüruf ikame oranı %0, %20, %40, %60 ve %80 olan 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan ve iki ayrı ortamda kür edilen harç numuneleri için 7, 28, 90 ve 180. günlere ait boşluk oranı ve su emme değerleri TS 3624 (1981)'e uygun olarak bulunmuştur.

-Kapiler Su Emme Katsayısının Tayini: Cüruf ikame oranı %0, %20, %40, %60 ve %80 olan 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan ve iki farklı ortamda kür edilen 28 günlük harç numuneleri için TS 4045 (1984) doğrultusunda kapiler su emme katsayıları bulunmuştur.

-Karbonatlaşma Tayini: Cüruf ikame oranı %0, %20, %40, %60 ve %80 olan 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan ve iki ayrı ortamda kür edilen prizmatik harç numuneleri için 7, 28, 90 ve 180. günlere ait karbonatlaşma değerleri, numuneler üzerinde uygulanan phenophthalein testi ile tayin edilmiştir.

3.5.3. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufllu Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Çalışmalar

-Eğilme-Çekme Mukavemetinin Tayini: Cüruf ikame oranı %20, %40, %60, %80 ve %100 olan 0.50 su/bağlayıcı oranında hazırlanmış karışımlardan elde edilen aktivatörlü harç numuneleri TS EN 1015-11 (2000)'e uygun olarak eğilmede çekme deneyine tabi tutulmuştur. Buna göre $22 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %65 bağıl neme sahip bir odada kür edilen prizmatik harç numuneler üzerinde 7, 28, 90 ve 180 günlük zaman dilimlerinde deney yapılarak alkalilerle aktive edilmiş cürufllu numunelerin eğilmede çekme mukavemeti değerleri bulunmuştur.

-Basınç Mukavemetinin Tayini: Cüruf ikame oranı %20, %40, %60, %80 ve %100 olan 0.50 su/bağlayıcı oranında hazırlanmış karışımlardan elde edilen aktivatörlü harç numuneleri TS EN 1015-11 (2000)'e uygun olarak basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Buna göre $22 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %65 bağıl neme sahip bir odada kür edilen prizmatik harç numuneler üzerinde 7, 28, 90 ve 180 günlük zaman dilimlerinde deney yapılarak alkalilerle aktive edilmiş cürufllu numunelerin basınç mukavemeti değerleri bulunmuştur.

-Karbonatlaşma Tayini: Cüruf ikame oranı %20, %40, %60, %80 ve %100 olan 0.50 su/bağlayıcı oranında hazırlanmış karışımlardan elde edilen aktivatörlü harç numunelerinin 7, 28, 90 ve 180. günlere ait karbonatlaşma değerleri, $22 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %65 bağıl neme sahip bir odada kür edilmelerinin ardından, numuneler üzerinde uygulanan phenophthalein testi ile tayin edilmiştir.

-Rötre Tayini: Cüruf ikame oranı %100 olan ve hiç Portland çimentosu içermeyen 0.50 su/bağlayıcı oranında hazırlanmış karışımlardan elde edilen 25x25x285 mm ebadındaki numuneler için TS 3453 (1981) doğrultusunda 6 aya kadar rötre değerleri ölçülmüştür. Sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sıvı sodyum silikat için kullanılan aktivatör dozajları da, ağırlıkça cüruf miktarına göre, %4 ve %8 Na konsantrasyonu olarak seçilmiştir. Sıvı sodyum silikat ile aktivasyonda seçilen silikat modülleri 0.75 ile 1.50 arasında değişirken, cürufun aktivasyonu sonucu elde edilen rötre değerleri, aynı su/bağlayıcı oranındaki cüruf katkısı içermeyen kontrol betonunkıyla birlikte kıyaslanmıştır.

3.6. Notasyonlar

Harç ve beton karışımlarında, geleneksel su/çimento terimi yerine, su/(çimento+cüruf) oranını ifade eden su/bağlayıcı tabiri kullanılmıştır. Ayrıca, ‘ıslak kür’ terimi su içerisinde $22 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki kürü, ‘kuru kür’ terimi ise %65 bağıl neme sahip yine aynı sıcaklıktaki kür durumunu ifade etmektedir.

Hazırlanan beton karışımlarını ifade etmek için çizelge ve şekillerde yer alan K350-0.3-00 terimi, 350 dozlu 0.30 su/bağlayıcı oranında %0 cüruf ile hazırlanan şahit betonu, K400-0.4-20 terimi ise 400 dozlu karışıma ait 0.40 su/bağlayıcı oranında %20 cüruf ilavesi yapılmış betonu göstermektedir.

Aktivatör içermeyen harç karışımlarının gösteriminde kullanılan H0.30-00 ifadesi 0.30 su/bağlayıcı oranında %0 cüruf ile üretilmiş şahit harç karışımını, H0.40-60 ifadesi ise, 0.40 su/bağlayıcı oranında %60 cüruf içeren harç karışımlarını göstermektedir.

Alkalilerle aktive edilmiş cürufli harçlarda ise, ağırlıkça cüruf miktarına göre %4, %6 ve %8 gibi üç farklı Na^+ konsantrasyonu seçilmek suretiyle yüksek fırın cüruflarının aktivasyonu sağlanmış ve bu amaçla, sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3), sodyum silikat çözeltisi (cam suyu) kimyasal aktivatör olarak kullanılmıştır. Cam suyu ile aktivasyonda, çözelti içerisinde 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50 gibi dört ayrı silikat modülü (M_s) elde edebilmek amacıyla, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit farklı oranlarda karıştırılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, araştırma kapsamında yer alan cüruf katkılı beton ve harç karışımlar üzerinde yürütülen deneyler ve bunlara ait sonuçlar, çizelgeler ve şekillerle desteklenmek suretiyle cüruf katkısı içermeyen kontrol karışımlarıyla kıyaslamalı olarak sunulmaktadır.

4.1. Beton Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneyler ve Sonuçları

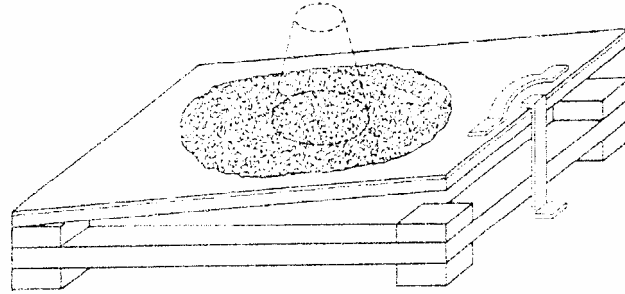
Bu kısımda, cüruf içeren ve içermeyen taze beton karışımları üzerinde gerçekleştirilen sarsma tablası ve birim ağırlık deney sonuçları ile birlikte, ıslak ve kuru kür olmak üzere iki farklı kür ortamına maruz bırakılmış sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yürütülen basınç dayanımı deneyleri değerlendirilmiş ve sonuçlar tartışılarak sunulmuştur.

4.1.1. Sarsma Tablası ve Birim Ağırlık Değerleri

Betonun işlenebilme özelliğini belirlemek üzere bugüne kadar birçok deney yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemlerden her biri taze betonun işlenebilme özelliği ile ilgili bazı beton özelliklerinin (kıvam ve akıcılık gibi) bulunmasına yaramakta ise de hiçbiri tam olarak betonunun işlenebilirliğini ölçmemektedir. Ayrıca, taze beton farklı koşullar altında deneye tabi tutulduğu için, değişik deney yöntemleriyle elde edilen sonuçların gerçekçi bir karşılaştırmasını yapabilmek de mümkün değildir. Taze beton karışımı içerisinde yer alan tüm bileşenlerin miktarları ve özellikleri, betonun işlenebilirliği üzerinde etkili olmaktadır.

Araştırmada, taze betonların kıvamlarını (ve işlenebilirliklerini) tespit etmek maksadıyla kıvam ölçme deney yöntemlerinden birisi olan sarsma tablası deneyi uygulanmıştır. Burada amaç, bir tablanın düşme hareketi yaptırılarak üzerindeki betonun yayılmasını ölçme yoluyla taze betonun kıvamını belirlemektir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, 70x70 cm ebadında iki levhadan oluşan sarsma tablasının bir tarafı menteşe ile birbirine bağlantılıdır. Üst çapı 13 cm, alt çapı 20 cm ve yüksekliği 20

cm olan kesik koni biçimindeki kalıp, sarsma tablasının tam ortasına gelecek şekilde yerleştirildikten sonra taze beton karışımı bu kalıbın içerisine iki eşit tabaka halinde doldurulur. Doldurma esnasında her tabaka sıkıştırma çubuğu ile 10 defa hafifçe şişlenir. Kalıbın çekilmesi ile serbest kalan beton kendi ağırlığı ile bir miktar yayıldıktan sonra üst levha 4 cm yükseklikten 15 saniyede 15 defa düşüş yaptırılır. Düşürme işleminin ardından taze beton tabakasının yayılma değeri, plaka kenarlarına paralel en büyük iki doğrultudaki ölçümün ortalaması alınarak belirlenir. Bu yöntem daha çok plastik ve akıcı betonların kıvamı hakkında bir fikir edinmek için uygun olmaktadır.



Şekil 4.1. Taze betonların yayılma değerlerini ölçmek için kullanılan sarsma tablası

Çalışmada kullanılan taze betonların işlenebilirliklerini düzenlemek amacıyla karışımlara koyulacak akışkanlaştırıcı miktarı, yapılan sarsma tablası deneylerine göre betonun 45 ± 5 cm yayılmasını sağlayacak şekilde belirlenmiş ve çimento dozajının yüzdesi olarak değişen oranlarda kullanılmıştır. Karışımların sarsma tablası yayılma değerleri, kullanılan akışkan dozajları ve taze betonların laboratuvardaki üretimleri sırasında slump deneyi yardımıyla ölçülen çökme miktarları Çizelge 4.1’de bir arada verilmektedir. Çizelgede verilen değerlerden birincisi sarsma tablası deneyine göre yayılma miktarını, ikincisi kullanılan hiperakışkanlaştırıcı katkı dozajını ve üçüncüsü ise slump deneyi sonucunda elde edilen çökme değerlerini göstermektedir. Çizelgeden, sabit bir işlenebilirlik için, su/bağlayıcı oranı arttıkça akışkan miktarlarında da bir azalma olduğu, benzer şekilde, karışım içerisinde bulunan bağlayıcı madde miktarının artmasıyla da akışkan miktarlarında bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Betonların slump deneyi sonucunda elde edilen çökme miktarları ise 17–24 cm arasında değişmiştir. Çimentonun belli oranlarda

yüksek fırın cürufu ile yer değiştirmesi, sarsma tablası deneylerinde kullanılan akışkan miktarları da dikkate alındığında taze betonların işlenebilirliğini iyileştirmektedir. İşlenebilirlikte meydana gelen bu iyileşmenin, Mehta (1989)'nın da bildirdiği gibi, mineral katkı maddelerinin camsı ve emici olmayan yüzey yapısı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Araştırma kapsamındaki betonlar, sarsma tablasından elde edilen yayılma değerleri neticesinde plastik ve akıcı kıvamdaki beton sınıflarına girmektedir.

Çizelge 4.1. Taze betonların sarsma tablası yayılma değerleri, kullanılan akışkan dozajları ve çökme değerleri

Çimento dozajı (kg/m ³)	Cüruf oranı	Su/bağlayıcı oranları								
		0.30			0.40			0.50		
350	Şahit	45 cm	% 3.5	19 cm	48 cm	% 1.5	19 cm	49 cm	% 0.2	20 cm
	% 20 YFC	42 cm	% 3.3	17 cm	49 cm	% 1.2	19 cm	50 cm	% 0	19 cm
	% 40 YFC	44 cm	% 2.5	19 cm	50 cm	% 1.0	17 cm	52 cm	% 0	19 cm
	% 60 YFC	44 cm	% 2.0	19 cm	47 cm	% 0.5	19 cm	48 cm	% 0	20 cm
	% 80 YFC	42 cm	% 1.6	19 cm	46 cm	% 0.8	20 cm	49 cm	% 0	21 cm
400	Şahit	45 cm	% 4.0	18 cm	47 cm	% 1.5	20 cm	48 cm	% 0.1	20 cm
	% 20 YFC	47 cm	% 3.5	17 cm	47 cm	% 1.0	18 cm	50 cm	% 0	18 cm
	% 40 YFC	46 cm	% 2.4	20 cm	49 cm	% 1.0	19 cm	48 cm	% 0	20 cm
	% 60 YFC	48 cm	% 1.5	19 cm	46 cm	% 0.6	19 cm	50 cm	% 0	20 cm
	% 80 YFC	45 cm	% 1.2	20 cm	45 cm	% 0.9	18 cm	51 cm	% 0	18 cm
450	Şahit	45 cm	% 4.0	19 cm	46 cm	% 1.0	22 cm	49 cm	% 0	22 cm
	% 20 YFC	47 cm	% 3.2	18 cm	45 cm	% 0.8	24 cm	51 cm	% 0	22 cm
	% 40 YFC	47 cm	% 2.6	18 cm	49 cm	% 0.5	24 cm	49 cm	% 0	23 cm
	% 60 YFC	49 cm	% 2.0	20 cm	48 cm	% 0.5	19 cm	50 cm	% 0	23 cm
	% 80 YFC	50 cm	% 1.8	20 cm	47 cm	% 0.3	19 cm	51 cm	% 0	22 cm

Hazırlanan tüm beton karışımları için taze betonun birim ağırlıkları, hem teorik birim ağırlık hem de gerçek birim ağırlık olmak üzere iki şekilde hesaplanmıştır. Teorik birim ağırlıklar, karışım hesaplarında 1 m³ betonda kullanılan malzemelerin ağırlıkları toplamı ile elde edilmiş, gerçek birim ağırlıklar ise beton karışımları dökülürken belirlenmiştir. Taze betonların laboratuvardaki dökümleri sırasında ölçülen birim ağırlıkları, 2.35 – 2.55 kg/dm³, hesap edilen teorik birim ağırlıkları ise 2.27 – 2.50 kg/dm³ arasında olup, sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Çizelge 4.2’de taze betonların laboratuvardaki dökümleri esnasında

ölçülen birim ağırlıkları verilmiştir. Çizelgeden, artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte birim ağırlıklarda da bir düşüş olduğu gözlenmektedir. Karışım içerisinde bulunan en hafif malzemenin su olması, artan su/bağlayıcı oranının beton yoğunluğunda meydana getirdiği bu azaltmayı da açıklamaktadır.

Çizelge 4.2. Taze betonların birim ağırlık değerleri (kg/dm^3)

Çimento dozajı (kg/m^3)	Cüruf oranı	Su/bağlayıcı oranları		
		0.30	0.40	0.50
350	Şahit	2.55	2.51	2.48
	% 20 YFC	2.55	2.52	2.47
	% 40 YFC	2.54	2.53	2.48
	% 60 YFC	2.54	2.51	2.47
	% 80 YFC	2.54	2.51	2.48
400	Şahit	2.55	2.54	2.45
	% 20 YFC	2.55	2.54	2.46
	% 40 YFC	2.55	2.55	2.45
	% 60 YFC	2.55	2.55	2.45
	% 80 YFC	2.55	2.53	2.45
450	Şahit	2.54	2.51	2.43
	% 20 YFC	2.55	2.50	2.39
	% 40 YFC	2.56	2.50	2.38
	% 60 YFC	2.55	2.50	2.38
	% 80 YFC	2.54	2.50	2.35

4.1.2. Beton Basınç Mukavemetleri

Betonun durabilite ve geçirmezlik gibi diğer karakteristikleri, esas olarak bazı pratik uygulamalarda daha önemli olabilmesine rağmen betonun basınç mukavemeti, genellikle onun en değerli özelliği olarak göz önünde tutulur ve betonun kalitesi, onun basınç dayanımı ile tanımlanır. Gevrek bir malzeme olması ve çekme dayanımının basınca göre çok küçük değerler alması nedeniyle beton, uygulamalarda daha çok basınç gerilmelerine maruz bırakılarak kullanılmaktadır. Betonarme yapılar, kesit içindeki basınç gerilmelerini betonun, çekme gerilmelerini de çeliğin olarak, iki malzemenin ortaklaşa çalışması ilkesine göre düzenlenir. Bununla birlikte, basınç dayanımı, sertleşmiş çimento hamurunun yapısıyla doğrudan ilişkili

olduğundan, genellikle beton basınç mukavemeti, betonun niteliği ile ilgili olarak kapsamlı bir bilgi vermektedir. Bu açıdan bakıldığında, betonun dayanım özelliği ile diğer özellikleri arasında bir korelasyon kurabilmek ve bu özelliklerin ne büyüklükte olduğunu değerlendirip fikir elde edebilmek mümkün olmaktadır.

Beton üzerinde yapılan çoğu çalışmada, betonun basınç dayanımı ile diğer özellikleri arasındaki ilişkiler araştırılmış, çalışma sonuçları, betonun birçok özelliğinin (geçirimlilik, aşınma, boşluk oranı vb) basınç mukavemeti ile aynı yönde değiştiğini göstermiştir. Bu doğrultuda, betonun basınç mukavemetini ve buna paralel olarak diğer özelliklerini de iyileştirebilmek amacıyla günümüz beton teknolojisinde, öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül gibi silis yönünden zengin mineral katkılar beton içerisinde kullanılmaya başlanmıştır.

Çalışma kapsamında araştırılan cüruf katkılı betonlar, yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonların üretiminde yıllardan beri birçok Avrupa ülkesinde başarıyla kullanılmakta ve çoğu ülke, cürufaların faydalarını da göz önüne alarak bu yapay puzolanların kullanımını kendi ulusal standartlarında önermektedirler.

4.1.2.1. 350 kg/m³ Çimento Dozlu Beton Numunelerin Basınç Mukavemetleri

Araştırma kapsamında yer alan, ıslak kür edilmiş 350 kg/m³ çimento dozlu sertleşmiş beton numuneleri için cüruf ikame oranına göre belirli zaman dilimlerinde elde edilen basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, bütün su/bağlayıcı oranları için, cüruf katkılı ve katkısız tüm betonların basınç mukavemeti değerlerinde zamana bağlı olarak bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bilindiği gibi beton, zamanla dayanım kazanan bir malzemedir. Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar devam ettikçe, çimento hamurunun yapısındaki hidrate elemanların miktarı da artmakta ve beton mukavemet kazanmaya devam etmektedir. Erken yaşlarda daha fazla olan betonun dayanım kazanma hızı, sonraki zamanlarda gittikçe azalan bir tempoda artmaya devam etmektedir (Postacıoğlu, 1986; Neville, 1981).

Öte yandan, tüm betonların basınç mukavemetlerinde, artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte düşüş olduğu görülmektedir. Su/bağlayıcı oranı, beton için son

derece önemlidir. Gerçekte hidrasyon için gerekli su miktarı, çimento miktarının %25-30'u kadar olmasına karşın, genellikle beton üretiminde, betonun taşınmasını ve yerleştirilmesini kolaylaştırmak amacıyla çok sakıncalı ve bilinçsiz bir şekilde su miktarını arttırma yoluna gidilir. Ancak, hidrasyonun gerektirdiği su miktarından daha fazlasını kullanmak, hidrasyona katılmayan fazla suyun zamanla buharlaşarak geride kılcal boşluklar bırakmasına ve bunun doğal bir sonucu olarak dayanımlarda da düşüslere neden olmaktadır (Baradan, 2000).

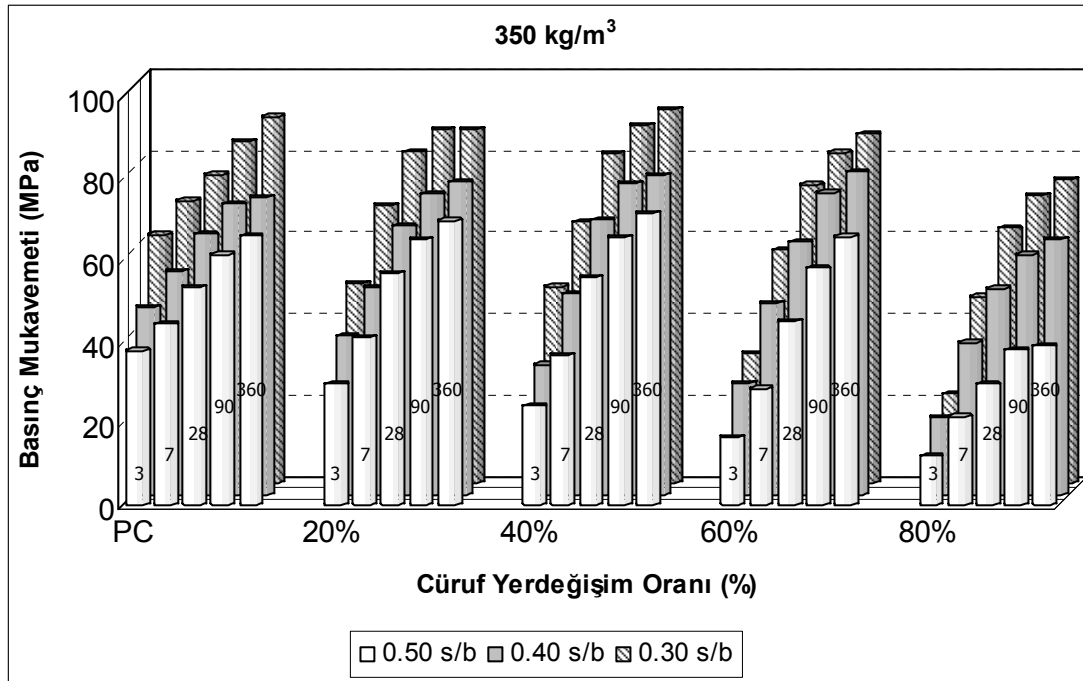
Çizelge 4.3. Islak kür edilmiş 350 kg/m³ çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti değerleri (MPa)

Su/bağlayıcı oranı	Cüruf oranı	Numune yaşı (gün)				
		3	7	28	90	360
0.30	Şahit	61.0	69.4	75.8	83.9	90.0
	% 20 YFC	49.1	68.3	81.4	86.8	86.9
	% 40 YFC	48.3	64.2	81.0	87.8	91.8
	% 60 YFC	31.9	57.3	73.3	81.2	85.7
	% 80 YFC	22.0	45.8	62.7	70.6	74.7
0.40	Şahit	45.9	54.8	63.9	71.3	72.8
	% 20 YFC	39.0	50.9	65.8	73.7	76.7
	% 40 YFC	31.9	49.1	67.2	76.3	78.2
	% 60 YFC	27.3	46.9	61.8	74.0	79.1
	% 80 YFC	18.9	37.3	50.4	58.9	62.6
0.50	Şahit	38.0	44.5	53.6	61.5	66.0
	% 20 YFC	29.8	41.2	57.0	65.4	69.8
	% 40 YFC	24.3	36.9	55.9	65.9	71.7
	% 60 YFC	16.8	28.7	45.1	58.3	65.9
	% 80 YFC	12.1	21.8	29.9	38.1	39.1

Çizelge 4.3'ten, 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip beton numunelerin zamana bağlı olarak gösterdikleri basınç mukavemetleri incelendiğinde, cüruf katkısının şahit numuneye göre basınç mukavemetine etkisi, 3. ve 7. günlerde görülmezken, %20 ve %40 oranında cüruf içeren betonlar için bu etki, ortalama olarak, 28. günde %7 ve 90. günde %4 mertebesinde olmuştur. 0.40 su/bağlayıcı oranındaki betonlarda ise cüruf ilavesinin dayanıma katkısı erken yaşlarda görülmemiş fakat %20 ve %40 cüruf katkılı betonlar şahitlerine göre 28. günde sırasıyla %3 ve %5 dayanım artışı sağlamışlardır. 90. günde %20, %40 ve %60 cüruf katkılı betonlar için dayanım

artışları sırasıyla %3, %7 ve %4 iken, bu oranlar 360. günde ise %5, %7 ve %9 olmuştur. 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip beton numunelerin zamana bağlı olarak gösterdikleri basınç mukavemetleri incelendiğinde ise, tüm cüruf ikame oranları için 3 ve 7 günlük dayanımlar şahit dayanımlardan daha az olmuştur. %20 ve %40 cüruf içeren betonlar ise dayanımlarda ortalama olarak, 28. günde %5, 90. günde %7 ve 360. günde %7 artış sağlamıştır.

Islak kür edilmiş ve 350 kg/m^3 çimento dozajına sahip betonların basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi ise Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, tüm ikame ve su/bağlayıcı oranları için 3 ve 7 günlük yaşlarda, cüruf betonların mukavemet değerleri, şahit betonlara göre daha düşük olmuştur. Öte yandan 28. günden sonra, %20 ve %40 cüruf katkılı betonlar, tüm su/bağlayıcı oranları için, şahit betonlardan daha fazla dayanım gelişimi göstermiş, %60 oranında cüruf içeren betonların dayanımı da, genel olarak şahit betonları ile eşdeğer olmuştur. İkame oranı %80 olan betonların tüm zaman dilimlerinde elde edilen dayanımları da bütün su/bağlayıcı oranları için şahitlerden daha az olmuştur.



Şekil 4.2. Islak kür edilmiş 350 kg/m^3 çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi

4.1.2.1.(1). 350 Dozlu Beton Basınç Mukavemetlerinin Şahit Numune Basınç Mukavemeti ile Kıyaslanması

Yüksek fırın cürufu ile üretilen betonların, kendi şahitlerine yaklaşım oranlarını belirlemek amacıyla 350 kg/m³ çimento dozajına sahip karışımlarda cüruf içeren betonların 3, 7, 28, 90 ve 360 gün gibi çeşitli yaşlardaki dayanımları, kendi su/bağlayıcı grubundaki şahit betonun aynı yaşlardaki dayanımlarına bölünmüş ve cüruf lu betonların dayanımları, şahit dayanımların bir yüzdesi olarak Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4. 350 dozlu ıslak kür edilmiş cüruf lu beton basınç mukavemetlerinin şahit beton basınç mukavemetine oranı (%)

Su/bağlayıcı oranı	Cüruf oranı	Numune yaşı (gün)				
		3	7	28	90	360
0.30	Şahit	100	100	100	100	100
	% 20 YFC	80.5	98.4	107.4	103.5	96.6
	% 40 YFC	79.2	92.5	106.9	104.6	102.0
	% 60 YFC	52.3	82.6	96.7	96.8	95.2
	% 80 YFC	36.1	66.0	82.7	84.1	83.0
0.40	Şahit	100	100	100	100	100
	% 20 YFC	85.0	92.9	103.0	103.4	105.4
	% 40 YFC	69.5	89.6	105.2	107.0	107.4
	% 60 YFC	59.5	85.6	96.7	103.8	108.7
	% 80 YFC	41.2	68.1	78.9	82.6	86.0
0.50	Şahit	100	100	100	100	100
	% 20 YFC	78.4	92.6	106.3	106.3	105.8
	% 40 YFC	63.9	82.9	104.3	107.2	108.6
	% 60 YFC	44.2	64.5	84.1	94.8	99.8
	% 80 YFC	31.8	49.0	55.8	62.0	59.2

Soroka (1993)'nın bildirdiğine göre, cüruf katkılı betonların erken yaşlardaki mukavemetleri normal Portland çimentolu betonların dayanımdan düşüktür. Ancak son dönem mukavemetleri, iyi kür edilmek şartıyla normal Portland çimentolu betonun mukavemetine eşit ya da daha fazla olmaktadır. Bu durumda, cüruf katkılı betonların ilk zamanlardaki mukavemet gelişimleri yavaş olmakla birlikte, cüruf katkısının beton basınç dayanımına olumlu etkisi, ilerleyen yaşlarda daha da

belirginleşmekte ve normal bakım koşullarında bu etki, 28. günden sonra kendini göstermektedir.

Çizelge 4.4'te de görüldüğü gibi, 0.50 su/bağlayıcı oranındaki %40 cüruf katkılı betonun şahit betona kıyasla 3. ve 7. günlerde gösterdiği dayanım kayıpları, sırasıyla %36 ve %17'dir. Ancak, ilerleyen dönemde cüruf bu kayıpları telafi etmekte ve şahit betona göre 28. günde %4, 90. günde %7 ve 360. günde ise %9 daha fazla dayanım artışı sergilemektedir. Çizelgede, 0.30 su/bağlayıcı oranı için cüruf katkılı betonların, şahit beton dayanımlarına oranları 3. günde %36-81, 7. günde %66-98, 28. günde %83-107, 90. günde %84-105 ve 360. günde %83-102 civarında olmuştur. 0.40 su/bağlayıcı oranına bakıldığında ise cüruf betonların şahit betonları yakalama oranları 3. gün için %41-85, 7. gün için %68-93, 28. gün için %79-105, 90. gün için %83-107 ve 360. gün için de %86-109 arasında değişmiştir. Su/bağlayıcı oranının 0.50'ye yükselmesi durumunda cüruf katkılı betonların şahit betonu yakalama oranları ise 3. günde %32-78, 7. günde %49-93, 28. günde %56-106, 90. günde %62-107 ve 360. günde %59-109 arasında olmuştur.

Brooks ve ark. (1992)'nin da bildirdiği gibi, cüruf ikame oranındaki artışla meydana gelen mukavemet kaybı tüm cüruf yer değişim oranları için 3 ve 7 gün gibi erken yaşlarda daha belirgindir. Ancak bu olumsuz etki, sonraki dönemlerde kaybolmakta ve cüruf betonların mukavemeti normal Portland çimentolu betonunkine eşit ya da daha fazla olmaktadır. Örneğin, 0.40 su/bağlayıcı oranı ele alındığında, %20 cüruf katkılı betonun şahit betona göre 3. gündeki dayanım kaybı %15 iken, %40 cüruf katkılı beton da bu değer %30'a çıkmıştır. Ancak, %20 cüruf katkılı beton için 28. gündeki dayanım şahit betona göre %3 daha fazla olurken, %40 cüruf katkısı içeren betonda bu artış miktarı %5 mertebesinde yer almıştır.

Düşük su/bağlayıcı oranındaki betonlara kıyasla, yüksek su/bağlayıcı oranındaki betonların dayanımları, fazla miktardaki cüruf oranlarından olumsuz etkilenmekte ve bu betonlar, düşük ikame oranlı betonların belirli bir gündeki dayanımına daha uzun sürede yaklaşabilmektedir. Örneğin, 0.50 su/bağlayıcı oranı için, %60 cüruf katkılı betonun 28. gündeki dayanımı 45 MPa iken, %80 cüruf katkılı beton için bu değer 360. gün sonunda bile ancak 39 MPa olabilmektedir. Öte yandan, 0.30 su/bağlayıcı oranına bakıldığında, %60 cüruf katkılı betonun 28.

gündeki dayanımı 73 MPa iken, %80 cüruf katkılı beton daha 90. günde bu değere yaklaşarak 71 MPa dayanım göstermiştir. Yüksek miktarda cüruf kullanılmasıyla ortaya çıkan bu durumun, azalan hidratasyon ısısına ve hızına da bağlı olarak, yavaş seyreten puzolanik reaksiyonların bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Artan su/bağlayıcı oranı ise, hidrate olacak taneler arasındaki mesafenin artmasına neden olduğundan, bu olumsuzluğa katkı sağlayan ilave bir faktör durumundadır.

Ayrıca, artan su/bağlayıcı oranı, yüksek ikame yüzdelerine sahip cürufli betonların dayanımlarını, daha belirgin bir şekilde düşürmüş, %80 cürufli betona bakıldığında, şahit betonun dayanımlarına kıyasla 28. günde meydana gelen düşüşler 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranları için sırasıyla %17, %21 ve %44 olmuştur.

4.1.2.1.(2). 350 Dozlu Betonların 28 Günlük Şahit Numune Dayanımlarına Göre Bağlı Dayanımları

Yüksek fırın cürufu ile üretilen betonların 28 günlük şahit betonların basınç mukavemetine yaklaşım oranlarını belirlemek amacıyla 350 kg/m³ çimento dozajına sahip karışımlarda cüruf içeren beton numunelerin basınç dayanımı, şahit betonların 28 günlük basınç dayanımı ile kıyaslanmıştır.

Beton numunelerin çeşitli yaşlardaki dayanımları kendi su/bağlayıcı oranı grubuna ait olan şahit numunenin 28 günlük basınç dayanımlarına bölünerek 28 günlük basınç dayanımlarının bir yüzdesi olarak Çizelge 4.5'te sunulmaktadır. Çizelgeden de görüleceği üzere cüruf katkılı betonların, şahit beton dayanımlarına oranları zamanla artarak, 0.30 su/bağlayıcı oranı için 3. günde %29-65, 7. günde %61-90, 28. günde %83-107, 90. günde %93-116 ve 360. günde %99-121 civarında olmuştur. 0.40 su/bağlayıcı oranına bakıldığında ise cürufli betonların şahit betonları yakalama oranları 3. gün için %30-61, 7. gün için %58-80, 28. gün için %79-105, 90. gün için %92-119 ve 360. gün için de %98-124 arasında değişmiştir. Su/bağlayıcı oranının 0.50'ye yükselmesi durumunda cüruf katkılı betonların şahit betonu yakalama oranları ise genel olarak artan su/bağlayıcı oranıyla azalma göstermekle birlikte 3. günde %23-56, 7. günde %41-77, 28. günde %56-106, 90. günde %71-123 ve 360. günde %73-134 arasında olmuştur.

Çizelge 4.5. 350 dozlu betonların 28 günlük şahit numune dayanımlarına göre bağlı dayanımları (%)

Su/bağlayıcı oranı	Cüruf oranı	Numune yaşı (gün)				
		3	7	28	90	360
0.30	Şahit	80.5	91.6	100	110.7	118.7
	% 20 YFC	64.8	90.1	107.4	114.5	114.6
	% 40 YFC	63.7	84.7	106.9	115.8	121.1
	% 60 YFC	42.1	75.6	96.7	107.1	113.1
	% 80 YFC	29.0	60.4	82.7	93.1	98.5
0.40	Şahit	71.8	85.8	100	111.6	113.9
	% 20 YFC	61.0	79.7	103.0	115.3	120.0
	% 40 YFC	49.9	76.8	105.2	119.4	122.4
	% 60 YFC	42.7	73.4	96.7	115.8	123.8
	% 80 YFC	29.6	58.4	78.9	92.2	98.0
0.50	Şahit	70.9	83.0	100	114.7	123.1
	% 20 YFC	55.6	76.9	106.3	122.0	130.2
	% 40 YFC	45.3	68.8	104.3	122.9	133.8
	% 60 YFC	31.3	53.5	84.1	108.8	122.9
	% 80 YFC	22.6	40.7	55.8	71.1	72.9

4.1.2.2. 400 kg/m³ Çimento Dozlu Beton Numunelerin Basınç Mukavemetleri

Betonu meydana getiren ve agrega tanelerini birbirine bağlayan çimento hamurunun mukavemetini kaybetmesi ile birlikte betonun da mukavemeti sona ereceğinden, kullanılan çimentonun cinsi ve miktarı, beton mukavemeti için oldukça önemlidir. Karışımdaki çimento miktarının artmasıyla, bağlayıcı madde hamurunun da hacmi artacağından, herhangi bir zorlama altındaki çimento hamurunda oluşacak gerilmeler azalmakta ve beton daha büyük yükler altında kırılmaktadır. Ancak, çimento miktarındaki artışın, betonun basınç mukavemetinde ne kadar bir artış sağlayacağı kesin olarak anlaşılamamıştır. Bununla birlikte, kullanılan çimento miktarındaki değişim, dar bir aralıkta tutulduğunda çimento miktarı ile mukavemet arasında lineer bir bağıntının varlığını kabul etmek gereklidir (Postacıoğlu, 1987).

Artan çimento dozajının yüksek fırın cürufllu betonların basınç mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak üzere 400 kg/m³ çimento miktarına sahip karışımların basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.6’da sunulmuştur.

Çizelge 4.6'ya bakıldığında, 400 kg/m³ çimento dozajındaki betonlar için elde edilen sonuçların, 350 kg/m³ çimento dozajındaki betonlardan elde edilen sonuçlarla genel olarak uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Buna göre çizelgeden, bütün su/bağlayıcı oranları için, cüruf katkılı ve katkısız tüm betonların basınç mukavemeti değerlerinde zamana bağlı olarak bir artış meydana geldiği ve tüm betonların basınç mukavemetlerinde, artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte düşüşler olduğu görülmektedir.

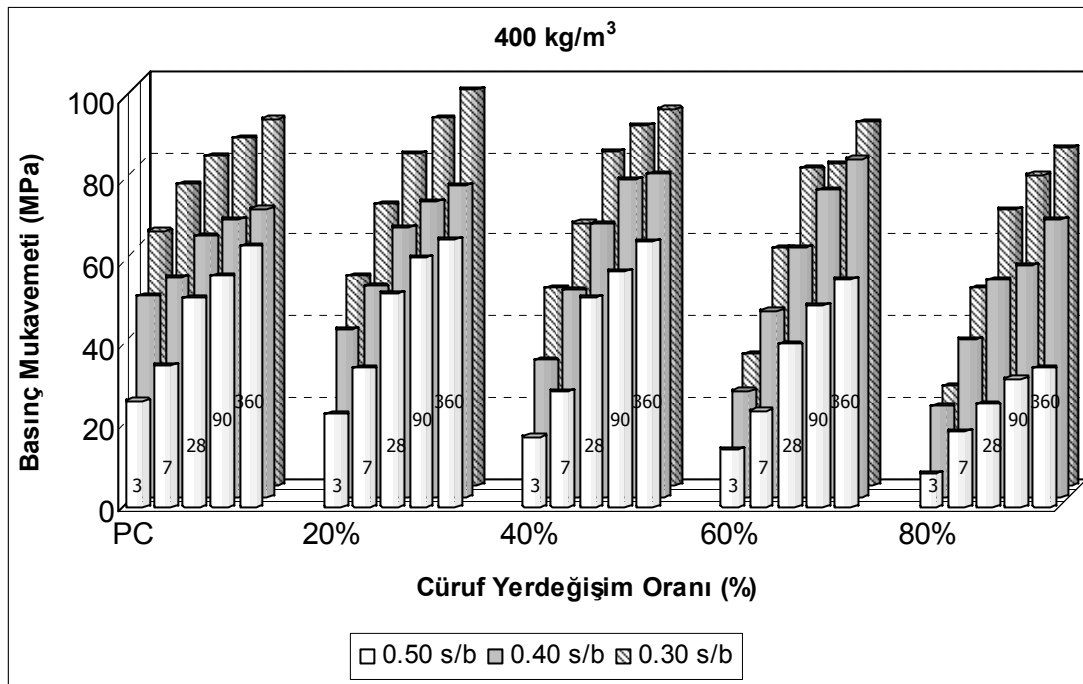
Çizelge 4.6. Islak kür edilmiş 400 kg/m³ çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti değerleri (MPa)

Su/bağlayıcı oranı	Cüruf oranı	Numune yaşı (gün)				
		3	7	28	90	360
0.30	Şahit	62.5	73.8	80.7	85.2	89.9
	% 20 YFC	51.4	69.0	81.4	90.1	97.1
	% 40 YFC	48.5	64.5	82.0	88.3	92.4
	% 60 YFC	32.3	58.3	77.8	79.0	89.2
	% 80 YFC	24.5	48.5	67.7	76.2	82.9
0.40	Şahit	49.2	53.7	63.9	67.9	70.6
	% 20 YFC	41.0	51.5	66.0	72.4	76.4
	% 40 YFC	33.4	50.6	66.9	77.9	79.0
	% 60 YFC	26.0	45.6	61.1	75.1	82.8
	% 80 YFC	22.2	38.6	53.1	56.8	68.0
0.50	Şahit	26.2	34.9	51.4	56.8	64.1
	% 20 YFC	22.9	34.2	52.6	61.4	65.8
	% 40 YFC	17.4	28.6	51.6	57.9	65.2
	% 60 YFC	14.4	23.8	40.1	49.6	56.0
	% 80 YFC	8.4	18.7	25.3	31.6	34.3

Öte yandan, 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip beton numunelerin zamana bağlı olarak gösterdikleri basınç mukavemetleri incelendiğinde, cüruf katkısının şahit numuneye göre basınç mukavemetine etkisi, 3. ve 7. günlerde görülmezken, %20 cüruf katkılı beton için bu etki 28. günde %1, 90. günde %6 ve 360. günde %8 olmuştur. %40 oranında cüruf içeren betonlar ise şahit numuneye göre 28, 90 ve 360 günlük zaman dilimlerinde sırasıyla %2, %4 ve %3 dayanım artışları göstermiştir. 0.40 su/bağlayıcı oranındaki betonlarda ise cüruf ilavesinin dayanıma katkısı erken yaşlarda görülmemiş fakat %20 ve %40 cüruf katkılı betonlar şahitlerine göre 28.

günde sırasıyla %3 ve %5 dayanım artışı sağlamışlardır. 90. günde %20, %40 ve %60 cüruf katkılı betonlar için dayanım artışları sırasıyla %7, %15 ve %11 iken, bu oranlar 360. günde ise %8, %12 ve %17 olmuştur. 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip beton numunelerin zamana bağlı olarak gösterdikleri basınç mukavemetleri incelendiğinde ise, tüm cüruf ikame oranları için 3 ve 7 günlük dayanımlar şahit dayanımlardan daha az olmuştur. %20 ve %40 cüruf katkılı betonlar şahitlerine göre 28. günde sırasıyla %2 ve %1 dayanım artışı sağlamışlardır. 90. günde %20 ve %40 cüruf katkılı betonlar için dayanım artışları sırasıyla %8 ve %2 iken, bu oranlar 360. günde ise %3 ve %2 olmuştur.

Islak kür edilmiş ve 400 kg/m^3 çimento dozajına sahip betonların basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi ise Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Islak kür edilmiş 400 kg/m^3 çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi

Şekil 4.3'ten de görüldüğü gibi, tüm ikame ve su/bağlayıcı oranlarında, cürufli betonların mukavemetleri, şahit betonların dayanımlarıyla kıyaslandığında 3 ve 7 günlük yaşlar için daha düşüktür. Ancak, %20 ve %40 cüruf katkılı betonlar, şahit betonlara göre 28. günden sonra tüm su/bağlayıcı oranları için daha yüksek

dayanım gelişimi göstermiş, %60 oranında cüruf içeren betonların dayanımı da, genel olarak şahit betonlarıinkiyle eşdeğer olmuştur. Cüruf oranı %80 olan betonların tüm zaman dilimlerindeki dayanımları ise, bütün su/bağlayıcı oranları için şahit betonlardan daha azdır.

4.1.2.2.(1). 400 Dozlu Beton Basınç Mukavemetlerinin Şahit Numune Basınç Mukavemeti ile Kıyaslanması

Yüksek fırın cürufu ile üretilen betonların, kendi şahitlerine yaklaşım oranlarını belirlemek amacıyla 400 kg/m³ çimento dozajına sahip karışımlarda cüruf içeren betonların 3, 7, 28, 90 ve 360 gün gibi çeşitli yaşlardaki dayanımları, kendi su/bağlayıcı grubundaki şahit betonun aynı yaşlardaki dayanımlarına bölünmüş ve cüruf lu betonların dayanımları, şahit dayanımların bir yüzdesi olarak Çizelge 4.7’de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Islak kür edilmiş 400 dozlu beton basınç mukavemetlerinin aynı gündeki kendi şahitlerine oranı (%)

Su/bağlayıcı oranı	Cüruf oranı	Numune yaşı (gün)				
		3	7	28	90	360
0.30	Şahit	100	100	100	100	100
	% 20 YFC	82.2	93.5	100.9	105.8	108.0
	% 40 YFC	77.6	87.4	101.6	103.6	102.8
	% 60 YFC	51.7	79.0	96.4	92.7	99.2
	% 80 YFC	39.2	65.7	83.9	89.4	92.2
0.40	Şahit	100	100	100	100	100
	% 20 YFC	83.3	95.9	103.3	106.6	108.2
	% 40 YFC	67.9	94.2	104.7	114.7	111.9
	% 60 YFC	52.8	84.9	95.6	110.6	117.3
	% 80 YFC	45.1	71.9	83.1	83.7	96.3
0.50	Şahit	100	100	100	100	100
	% 20 YFC	87.4	98.0	102.3	108.1	102.7
	% 40 YFC	66.4	81.9	100.4	101.9	101.7
	% 60 YFC	55.0	68.2	78.0	87.3	87.4
	% 80 YFC	32.1	53.6	49.2	55.6	53.5

Çizelgeden de görüldüğü üzere, tüm su/bağlayıcı oranları için, cüruf katkılı betonların 3 ve 7 gün gibi ilk zamanlardaki mukavemet gelişimleri yavaştır. Fakat, ilerleyen yaşlarda cüruf katkısının beton basınç dayanımına etkisi giderek belirginleşmekte ve bu olumlu etki bütün su/bağlayıcı oranları için, özellikle %20 ve %40 cüruf katkılı betonlarda 28. günden sonra kendini göstermektedir.

Çizelge 4.7’de de görüldüğü gibi, 0.40 su/bağlayıcı oranındaki %20 cüruf katkılı betonun, şahit betona göre 3. ve 7. günlerde gösterdiği dayanım kayıpları, sırasıyla %17 ve %4’tür. Ancak, ilerleyen dönemde cüruf bu kayıpları telafi etmekte ve şahit betona göre 28. günde %3, 90. günde %7 ve 360. günde ise %8 daha fazla dayanım artışı sergilemektedir. Çizelgede, 0.30 su/bağlayıcı oranı için cüruf katkılı betonların, şahit beton dayanımlarına oranları 3. günde %39-82, 7. günde %66-94, 28. günde %84-102, 90. günde %90-106 ve 360. günde %92-108 civarında olmuştur. 0.40 su/bağlayıcı oranına bakıldığında ise cüruf betonların şahit betonları yakalama oranları 3. gün için %45-83, 7. gün için %72-96, 28. gün için %83-105, 90. gün için %84-115 ve 360. gün için de %96-117 arasında değişmiştir. Su/bağlayıcı oranının 0.50’ye yükselmesi durumunda cüruf katkılı betonların şahit betonu yakalama oranları ise 3. günde %32-87, 7. günde %54-98, 28. günde %49-102, 90. günde %56-108 ve 360. günde %54-103 arasında olmuştur.

Bununla birlikte, cüruf ikame oranındaki artışla meydana gelen mukavemet kaybı tüm cüruf yer değişim oranları için 3 ve 7 gün gibi erken yaşlarda daha belirgindir. Ancak bu olumsuz etki, sonraki dönemlerde kaybolmakta ve cüruf betonların mukavemeti normal Portland çimentolu betonunkine eşit ya da daha fazla olmaktadır. Örneğin, 0.40 su/bağlayıcı oranı ele alındığında, %20 cüruf katkılı betonun şahit betona göre 3. gündeki dayanım kaybı %17 iken, %40 cüruf katkılı betonda bu değer %32’ye çıkmıştır. Ancak, %20 cüruf katkılı beton için 28. gündeki dayanım şahit betona göre %3 daha fazla olurken, %40 cüruf katkısı içeren betonda bu artış miktarı %5 mertebesinde yer almıştır.

Artan su/bağlayıcı oranı, yüksek ikame yüzdelerine sahip cüruf betonların dayanımlarını, şahit betonlara oranla, daha belirgin bir şekilde düşme yönünde etkilemiş, %80 cüruf ikameli beton ele alındığı zaman, şahit betonun dayanımlarına

kıyasla meydana gelen bu düşüş miktarları 28. günde 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranları için sırasıyla %16, %17 ve %51 olmuştur.

4.1.2.2.(2). 400 Dozlu Betonların 28 Günlük Şahit Numune Dayanımlarına Göre Bağlı Dayanımları

Yüksek fırın cürufu ile üretilen betonların 28 günlük şahit betonların basınç mukavemetine yaklaşım oranlarını belirlemek amacıyla 400 kg/m³ çimento dozajına sahip karışımlarda cüruf içeren beton numunelerin basınç dayanımı, şahit betonların 28 günlük basınç dayanımı ile kıyaslanmıştır.

Beton numunelerin çeşitli yaşlardaki dayanımları kendi su/bağlayıcı oranı grubuna ait olan şahit numunenin 28 günlük basınç dayanımlarına bölünerek 28 günlük basınç dayanımlarının bir yüzdesi olarak Çizelge 4.8’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.8. 400 dozlu betonların 28 günlük şahit numune dayanımlarına göre bağlı dayanımları (%)

Su/bağlayıcı oranı	Cüruf oranı	Numune yaşı (gün)				
		3	7	28	90	360
0.30	Şahit	77.4	91.4	100	105.6	111.4
	% 20 YFC	63.7	85.5	100.9	111.6	120.3
	% 40 YFC	60.1	79.9	101.6	109.4	114.5
	% 60 YFC	40.0	72.2	96.4	97.9	110.5
	% 80 YFC	30.4	60.1	83.9	94.4	102.7
0.40	Şahit	77.0	84.0	100	106.3	110.5
	% 20 YFC	64.2	80.6	103.3	113.3	119.6
	% 40 YFC	52.3	79.2	104.7	121.9	123.6
	% 60 YFC	40.7	71.4	95.6	117.5	129.6
	% 80 YFC	34.7	60.4	83.1	88.9	106.4
0.50	Şahit	51.0	67.9	100	110.5	124.7
	% 20 YFC	44.6	66.5	102.3	119.5	128.0
	% 40 YFC	33.9	55.6	100.4	112.6	126.8
	% 60 YFC	28.0	46.3	78.0	96.5	108.9
	% 80 YFC	16.3	36.4	49.2	61.5	66.7

Çizelgeden de görüleceği üzere cüruf katkılı betonların, şahit beton dayanımlarına oranları zamanla artarak, 0.30 su/bağlayıcı oranı için 3. günde %30-

64, 7. günde %60-86, 28. günde %84-102, 90. günde %94-112 ve 360. günde %103-120 civarında olmuştur. 0.40 su/bağlayıcı oranına bakıldığında ise cürufli betonların şahit betonları yakalama oranları 3. gün için %35-64, 7. gün için %60-81, 28. gün için %83-105, 90. gün için %89-122 ve 360. gün için de %106-130 arasında değişmiştir. Su/bağlayıcı oranının 0.50'ye yükselmesi durumunda cüruf katkılı betonların şahit betonu yakalama oranları ise genel olarak artan su/bağlayıcı oranıyla azalma göstermekle birlikte 3. günde %16-45, 7. günde %37-67, 28. günde %49-102, 90. günde %62-119 ve 360. günde %67-128 arasında olmuştur.

4.1.2.3. 450 kg/m³ Çimento Dozlu Beton Numunelerin Basınç Mukavemetleri

Çimento dozajı 450 kg/m³ olan betonlar için çeşitli zaman dilimlerinde elde edilen basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.9'da sunulmaktadır.

Çizelge 4.9. Islak kür edilmiş 450 kg/m³ çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti değerleri (MPa)

Su/bağlayıcı oranı	Cüruf oranı	Numune yaşı (gün)				
		3	7	28	90	360
0.30	Şahit	63.8	75.7	80.3	85.7	92.8
	% 20 YFC	58.0	72.1	81.8	90.1	95.9
	% 40 YFC	49.8	66.4	83.8	91.4	96.8
	% 60 YFC	36.8	63.2	80.6	92.5	101.3
	% 80 YFC	26.3	50.2	66.3	77.4	78.4
0.40	Şahit	53.0	59.2	64.3	71.0	79.4
	% 20 YFC	45.8	60.3	73.5	82.3	86.6
	% 40 YFC	35.9	56.3	66.4	81.0	84.6
	% 60 YFC	26.9	38.6	61.8	73.4	80.6
	% 80 YFC	22.6	36.7	46.8	54.6	58.9
0.50	Şahit	25.8	36.6	48.7	50.5	60.2
	% 20 YFC	21.3	33.2	50.4	56.2	66.7
	% 40 YFC	16.7	28.3	49.3	53.4	65.1
	% 60 YFC	13.0	20.8	39.5	49.1	57.4
	% 80 YFC	9.0	17.5	27.7	35.0	39.6

Çizelge 4.9'a bakıldığında, yine bütün su/bağlayıcı oranları için, cüruf katkılı ve katkısız tüm betonların basınç mukavemeti değerlerinde zamana bağlı olarak bir

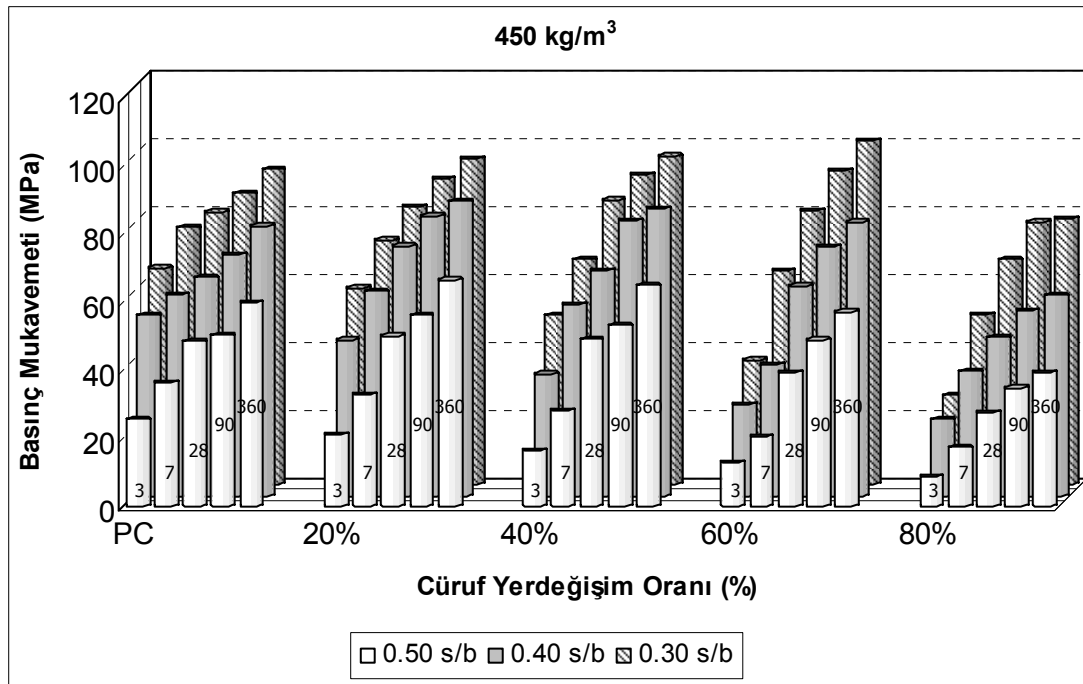
artış meydana geldiği ve tüm betonların basınç mukavemetlerinde, artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte düşüşler olduğu görülmektedir.

Beton karışımlarında kullanılan çimento miktarının artması ile basınç mukavemetinde de genel olarak bir artış görülmekle birlikte bu durum su/bağlayıcı oranına göre de değişmektedir. Beton karışımlarında kullanılan çimento miktarının 350 kg/m^3 'ten 400 ve 450 kg/m^3 'e çıkması sonucu çimento dozajının artmasına bağlı olarak meydana gelebilecek artış 0.50 su/bağlayıcı oranlı serilerde görülememiştir. Su/bağlayıcı oranının artmasıyla dayanımlarda oluşan düşüşlerin yüzdesi çimento dozajının artmasıyla daha da fazla olmaktadır. Dolayısıyla, bilinçsizce arttırılan çimento dozajından fayda yerine zarar gelecektir. Bu nedenle, artan çimento dozajına bağlı olarak karışıma giremeyecek agrega miktarının basınç mukavemetini etkilediği ve herhangi bir su/bağlayıcı oranı için maksimum dayanım veren optimum çimento dozajı olduğu düşünülmektedir. Bu durum literatürde de belirtilmektedir (Postacıoğlu, 1987).

Öte yandan, 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip numunelerin zamana bağlı olarak gösterdikleri basınç mukavemetleri incelendiğinde, cüruf katkısının şahit numuneye göre basınç mukavemetine etkisi, 3. ve 7. günlerde görülmezken, %20 cüruf katkısı içeren betonlar 28, 90 ve 360 günlük zaman dilimlerinde sırasıyla %2, %5 ve %3 dayanım artışları göstermiştir. %40 cüruf katkılı betonlar ise şahitlerine göre 28. günde %4, 90. günde %7 ve 360. günde %4 daha fazla dayanım geliştirmiştir. %60 oranında cüruf içeren betonlar ise 90 ve 360 günlük zaman dilimlerinde sırasıyla %8 ve %9 dayanım artışları sergilemiştir. 0.40 su/bağlayıcı oranındaki betonlarda ise cüruf ilavesinin dayanıma katkısı erken yaşlarda görülmemiş fakat %20 ve %40 cüruf katkılı betonlar şahitlerine göre 28. günde sırasıyla %14 ve %3 dayanım artışı sağlamışlardır. 90. günde %20, %40 ve %60 cüruf katkılı betonlar için dayanım artışları sırasıyla %16, %14 ve %4 iken, bu oranlar 360. günde ise %9, %7 ve %2 olmuştur. 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip beton numunelerin zamana bağlı olarak gösterdikleri basınç mukavemetleri incelendiğinde ise, tüm cüruf ikame oranları için 3 ve 7 günlük dayanımlar şahit dayanımlardan daha az olmuştur. %20 ve %40 cüruf katkılı betonlar şahitlerine göre 28. günde sırasıyla %3 ve %1 dayanım artışı

sağlamışlardır. 90. günde %20 ve %40 cüruf katkılı betonlar için dayanım artışları sırasıyla %11 ve %6 iken, bu oranlar 360. günde ise %11 ve %8 olmuştur.

Islak kür edilmiş ve 450 kg/m^3 çimento dozajına sahip betonların basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi ise Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4'ten de görüldüğü gibi, tüm ikame ve su/bağlayıcı oranlarında, cürufli betonların mukavemetleri, şahit betonların dayanımlarıyla kıyaslandığında 3 ve 7 günlük yaşlar için daha düşük olmuştur. Ancak, %20 ve %40 cüruf katkılı betonlar, şahit betonlara göre 28. günden sonra tüm su/bağlayıcı oranları için daha yüksek dayanım gelişimi göstermiş, %60 oranında cüruf içeren betonların dayanımı da genel olarak şahit betonlarınkine eşdeğer ya da ondan daha yüksek olmuştur. Cüruf oranı %80 olan betonların tüm zaman dilimlerinde dayanımları ise, bütün su/bağlayıcı oranları için şahit betonlardan ve diğer cüruf katkılı betonlardan daha az olarak bulunmuştur.



Şekil 4.4. Islak kür edilmiş 450 kg/m^3 çimento dozajına sahip karışımlar için basınç mukavemeti

4.1.2.3.(1). 450 Dozlu Beton Basınç Mukavemetlerinin Şahit Numune Basınç Mukavemeti ile Kıyaslanması

Yüksek fırın cürufu ile üretilen betonların, kendi şahitlerine yaklaşım oranlarını belirlemek amacıyla 450 kg/m³ çimento dozajına sahip karışımlarda cüruf içeren betonların 3, 7, 28, 90 ve 360 gün gibi çeşitli yaşlardaki dayanımları, kendi su/bağlayıcı grubundaki şahit betonun aynı yaşlardaki dayanımlarına bölünmüş ve cürufli betonların dayanımları, şahit dayanımların bir yüzdesi olarak Çizelge 4.10'da sunulmuştur. Çizelgeden de görüldüğü üzere, tüm su/bağlayıcı oranları için, cüruf katkılı betonların 3 ve 7 gün gibi ilk zamanlardaki mukavemet gelişimleri yavaş olmaktadır. Fakat ilerleyen yaşlara bakıldığında, cüruf katkısının beton basınç dayanımına etkisi giderek belirginleşmekte ve bu olumlu etki %20 ve %40 cüruf katkılı betonlarda 28. günden sonra kendini göstermektedir. Cüruf yer değişim oranı %60 olan betonların da, özellikle düşük su/bağlayıcı oranları için, 28. günden sonra şahitlerine eşdeğer dayanım sergilediklerini söylemek mümkündür.

Çizelge 4.10. Islak kür edilmiş 450 dozlu beton basınç mukavemetlerinin aynı gündeki kendi şahitlerine oranı (%)

Su/bağlayıcı oranı	Cüruf oranı	Numune yaşı (gün)				
		3	7	28	90	360
0.30	Şahit	100	100	100	100	100
	% 20 YFC	90.9	95.2	101.9	105.1	103.3
	% 40 YFC	78.1	87.7	104.4	106.7	104.3
	% 60 YFC	57.7	83.5	100.4	107.9	109.2
	% 80 YFC	41.2	66.3	82.6	90.3	84.5
0.40	Şahit	100	100	100	100	100
	% 20 YFC	86.4	101.9	114.3	115.9	109.1
	% 40 YFC	67.7	95.1	103.3	114.1	106.5
	% 60 YFC	50.8	65.2	96.1	103.4	101.5
	% 80 YFC	42.6	62.0	72.8	76.9	74.2
0.50	Şahit	100	100	100	100	100
	% 20 YFC	82.6	90.7	103.5	111.3	110.8
	% 40 YFC	64.7	77.3	101.2	105.7	108.1
	% 60 YFC	50.4	56.8	81.1	97.2	95.3
	% 80 YFC	34.9	47.8	56.9	69.3	65.8

Çizelge 4.10'da da görüldüğü gibi, 0.30 su/bağlayıcı oranındaki %40 cüruf katkılı betonun, şahit betona göre 3. ve 7. günlerde gösterdiği dayanım kayıpları, sırasıyla %22 ve %12'dir. Ancak, ilerleyen dönemde cüruf bu kayıpları telafi etmekte ve şahit betona göre 28. günde %4, 90. günde %7 ve 360. günde ise %4 daha fazla dayanım artışı sergilemektedir. Çizelgede, 0.30 su/bağlayıcı oranı için cüruf katkılı betonların, şahit beton dayanımlarına oranları 3. günde %41-91, 7. günde %66-95, 28. günde %83-104, 90. günde %90-108 ve 360. günde %85-109 civarında olmuştur. 0.40 su/bağlayıcı oranına bakıldığında ise cüruf betonların şahit betonları yakalama oranları 3. gün için %43-87, 7. gün için %62-102, 28. gün için %73-114, 90. gün için %77-116 ve 360. gün için de %74-109 arasında değişmiştir. Su/bağlayıcı oranının 0.50'ye yükselmesi durumunda cüruf katkılı betonların şahit betonu yakalama oranları ise 3. günde %35-83, 7. günde %48-91, 28. günde %57-103, 90. günde %69-111 ve 360. günde %66-111 arasında olmuştur.

Öte yandan, cüruf ikame oranındaki artışa bağlı olarak meydana gelen mukavemet kayıpları tüm cüruf yer değişim oranları için 3 ve 7 gün gibi erken yaşlarda daha belirgindir. Ancak bu olumsuz etki, sonraki dönemlerde kaybolmakta ve cüruf betonların mukavemeti şahit betonların dayanımına eşit ya da daha fazla olmaktadır. Örneğin, 0.50 su/bağlayıcı oranı ele alınırsa, %20 cüruf katkılı betonun şahit betona göre 3. gündeki dayanım kaybı %17 iken, %40 cüruf katkılı beton da bu değer %35'e çıkmıştır. Ancak 28. güne bakıldığında, her iki beton da şahide göre dayanım gelişimi göstermiş ve bu değerler %20 cüruf katkılı betonda %3, %40 cüruf katkılı betonda ise %1 civarında olmuştur.

Ayrıca, daha önceki dozajlarda da görüldüğü üzere, artan su/bağlayıcı oranı, yüksek ikame yüzdelerine sahip cüruf betonların dayanımlarını, şahit betonlara oranla daha belirgin bir şekilde düşme yönünde etkilemiş, %80 cüruf ikameli beton ele alındığı zaman, şahit betonun dayanımlarına kıyasla meydana gelen bu düşüş miktarları 28. günde 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranları için sırasıyla %17, %27 ve %43 olmuştur.

4.1.2.3.(2). 450 Dozlu Betonların 28 Günlük Şahit Numune Dayanımlarına Göre Bağlı Dayanımları

Yüksek fırın cürufu ile üretilen betonların 28 günlük şahit betonların basınç mukavemetine yaklaşım oranlarını belirlemek amacıyla 450 kg/m³ çimento dozajına sahip karışımlarda cüruf içeren beton numunelerin basınç dayanımı, şahit betonların 28 günlük basınç dayanımı ile kıyaslanmıştır.

Beton numunelerin çeşitli yaşlardaki dayanımları kendi su/bağlayıcı oranı grubuna ait olan şahit numunenin 28 günlük basınç dayanımlarına bölünerek 28 günlük basınç dayanımlarının bir yüzdesi olarak Çizelge 4.11’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.11. 450 dozlu betonların 28 günlük şahit numune dayanımlarına göre bağlı dayanımları (%)

Su/bağlayıcı oranı	Cüruf oranı	Numune yaşı (gün)				
		3	7	28	90	360
0.30	Şahit	79.5	94.3	100	106.7	115.6
	% 20 YFC	72.2	89.8	101.9	112.2	119.4
	% 40 YFC	62.0	82.7	104.4	113.8	120.5
	% 60 YFC	45.8	78.7	100.4	115.2	126.2
	% 80 YFC	32.8	62.5	82.6	96.4	97.6
0.40	Şahit	82.4	92.1	100	110.4	123.5
	% 20 YFC	71.2	93.8	114.3	128.0	134.7
	% 40 YFC	55.8	87.6	103.3	126.0	131.6
	% 60 YFC	41.8	60.0	96.1	114.2	125.3
	% 80 YFC	35.1	57.1	72.8	84.9	91.6
0.50	Şahit	53.0	75.2	100	103.7	123.6
	% 20 YFC	43.7	68.2	103.5	115.4	137.0
	% 40 YFC	34.3	58.1	101.2	109.7	133.7
	% 60 YFC	26.7	42.7	81.1	100.8	117.9
	% 80 YFC	18.5	35.9	56.9	71.9	81.3

Çizelgeden de görüleceği üzere, cüruf katkılı betonların, şahit beton dayanımlarına oranları zamanla artarak, 0.30 su/bağlayıcı oranı için 3. günde %33-72, 7. günde %63-90, 28. günde %83-104, 90. günde %96-115 ve 360. günde %98-126 civarında olmuştur. 0.40 su/bağlayıcı oranına bakıldığında ise cüruf betonların şahit betonları yakalama oranları 3. gün için %35-71, 7. gün için %57-94, 28. gün

için %73-114, 90. gün için %85-128 ve 360. gün için de %92-135 arasında değişmiştir. Su/bağlayıcı oranının 0.50'ye yükselmesi durumunda cüruf katkılı betonların şahit betonu yakalama oranları ise 3. günde %18-44, 7. günde %36-68, 28. günde %57-103, 90. günde %72-115 ve 360. günde %81-137 arasında olmuştur. 450 kg/m³ çimento dozajına sahip seride, daha önceki dozajlarda da olduğu gibi, su/bağlayıcı oranının artması ile cüruf katkılı numunelerin 28 günlük şahit numune basınç dayanımlarına yaklaşma değerlerinde, göreceli olarak bir düşüş meydana gelmiştir.

Çalışma kapsamındaki 350, 400 ve 450 kg/m³ çimento dozajları için verilen tüm şekil ve çizelgelerden de görüldüğü üzere, çimentoyle belirli oranlarda yer değiştirilerek beton içerisine katılan cüruf, ilk zamanlardaki beton dayanımlarını normal Portland çimentolu şahit betonlara göre düşürmektedir. Erken yaşlardaki dayanımlarda görülen bu azalma, cürufların düşük hidratasyon ısılarına bağlı olarak ortaya çıkan hidratasyon hızındaki yavaşlamadan kaynaklanmaktadır. Devam eden pozolanik reaksiyonlar neticesinde ise cüruf, 28. gün ve daha sonraki yaşlardan itibaren, gizli hidrolik bağlayıcılığını ortaya çıkartarak dayanım kazanmakta ve şahit betonlara eşdeğer ya da ondan daha yüksek basınç dayanımları sergilemektedir.

4.1.2.4. Kür Şartlarının Beton Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi

Kür şartlarının basınç mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak için bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu amaçla, 350, 400 ve 450 kg/m³ çimento dozajı ve 0.30, 0.40 ve 0.50 gibi üç ayrı su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan beton karışımları için sırası ile %0 (kontrol betonu), %20, %40, %60 ve %80 oranlarında cüruf yer değişimi yapılmıştır. Bu şekilde üretilen birbirinden farklı 45 adet beton karışımının her birinden 150×150×150 mm ebadında 6 adet küp numune alınmış, ertesi gün kalıpları sökülen numuneler, 22±2°C sıcaklığa ve %65 bağıl neme sahip kuru kür odasında 28 ve 90 günlük sürelerde küre tabi tutulmuşlardır. Sonuçlar, her bir yaş için 3 değer ortalaması alınarak verilmiş olup, kuru kür edilmiş numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları Çizelge 4.12'de sunulmuştur.

Çizelge 4.12. Kuru kür edilen betonların 28 ve 90 günlük basınç dayanımları (MPa)

Çimento dozajı (kg/m ³)	Cüruf oranı	S/B Oranı					
		0.30		0.40		0.50	
		28	90	28	90	28	90
350	Şahit	72.4	80.2	63.9	65.6	52.3	57.6
	% 20 YFC	73.3	83.8	60.4	68.6	50.6	54.1
	% 40 YFC	72.0	82.0	57.6	67.2	46.5	53.0
	% 60 YFC	57.2	62.2	52.6	61.0	40.4	42.9
	% 80 YFC	50.2	57.1	42.7	49.2	26.9	27.6
400	Şahit	73.1	78.1	65.6	67.1	36.9	41.4
	% 20 YFC	69.6	82.3	63.1	69.2	37.5	39.4
	% 40 YFC	66.5	79.4	61.6	69.9	35.4	37.2
	% 60 YFC	68.2	74.9	59.0	66.3	30.5	37.7
	% 80 YFC	54.4	57.5	47.2	51.9	19.7	22.1
450	Şahit	75.0	84.2	68.2	70.2	41.7	45.3
	% 20 YFC	73.2	85.4	69.1	73.6	36.3	38.9
	% 40 YFC	76.4	87.2	61.7	71.9	35.1	36.6
	% 60 YFC	58.2	70.0	54.2	61.6	28.3	30.2
	% 80 YFC	56.0	62.1	42.6	44.6	17.6	18.3

Çizelgeden, tüm betonların dayanımında artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte düşüşler olduğu ve bütün betonların basınç mukavemeti değerlerinde zamana bağlı olarak bir artış meydana geldiği görülmektedir. Genel olarak bakıldığında, bütün su/bağlayıcı oranları için, cüruf katkılı betonların şahit betona kıyasla gösterdiği dayanım kayıpları 28. günde daha fazla iken, devam eden pozolanik reaksiyonlar neticesinde 90. günde bu kayıplar daha az olmaktadır. Ayrıca, cüruf ikame oranındaki artışla meydana gelen mukavemet kaybı tüm ikame oranları için 28. günde daha belirgindir. Fakat cüruf artışıyla meydana gelen kayıp, sonraları kaybolmakta, 90. güne bakıldığında %40 cüruf katkılı betonun da şahide yakın ya da ondan daha yüksek dayanım geliştirdiği görülmektedir. Bu durumda, %20 cürufllu betonlar genellikle 28. günde, %40 cürufllu betonlar ise 90. günde kendini göstermektedir. Ayrıca düşük su/bağlayıcı oranındaki betonlara kıyasla, yüksek su/bağlayıcı oranındaki cürufllu betonlar, artan cüruf miktarından olumsuz etkilenmekte ve düşük ikame oranlı betonların belirli bir gündeki dayanımını ancak daha uzun bir sürede yakalayabilmektedir. Islak ve kuru kür edilmiş betonların 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'te sunulmuştur.

Çizelge 4.13. 28 gün ıslak ve kuru kür edilen betonların basınç dayanımları (MPa)

Çimento dozajı (kg/m ³)	Cüruf oranı	S/B Oranı					
		0.30		0.40		0.50	
		Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
350	Şahit	75.8	72.4	63.9	63.9	53.6	52.3
	% 20 YFC	81.4	73.3	65.8	60.4	57.0	50.6
	% 40 YFC	81.0	72.0	67.2	57.6	55.9	46.5
	% 60 YFC	73.3	57.2	61.8	52.6	45.1	40.4
	% 80 YFC	62.7	50.2	50.4	42.7	29.9	26.9
400	Şahit	80.7	73.1	63.9	65.6	51.4	36.9
	% 20 YFC	81.4	69.6	66.0	63.1	52.6	37.5
	% 40 YFC	82.0	66.5	66.9	61.6	51.6	35.4
	% 60 YFC	77.8	68.2	61.1	59.0	40.1	30.5
	% 80 YFC	67.7	54.4	53.1	47.2	25.3	19.7
450	Şahit	80.3	75.0	64.3	68.2	48.7	41.7
	% 20 YFC	81.8	73.2	73.5	69.1	50.4	36.3
	% 40 YFC	83.8	76.4	66.4	61.7	49.3	35.1
	% 60 YFC	80.6	58.2	61.8	54.2	39.5	28.3
	% 80 YFC	66.3	56.0	46.8	42.6	27.7	17.6

Çizelge 4.14. 90 gün ıslak ve kuru kür edilen betonların basınç dayanımları (MPa)

Çimento dozajı (kg/m ³)	Cüruf oranı	S/B Oranı					
		0.30		0.40		0.50	
		Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
350	Şahit	83.9	80.2	71.3	65.6	61.5	57.6
	% 20 YFC	86.8	83.8	73.7	68.6	65.4	54.1
	% 40 YFC	87.8	82.0	76.3	67.2	65.9	53.0
	% 60 YFC	81.2	62.2	74.0	61.0	58.3	42.9
	% 80 YFC	70.6	57.1	58.9	49.2	38.1	27.6
400	Şahit	85.2	78.1	67.9	67.1	56.8	41.4
	% 20 YFC	90.1	82.3	72.4	69.2	61.4	39.4
	% 40 YFC	88.3	79.4	77.9	69.9	57.9	37.2
	% 60 YFC	79.0	74.9	75.1	66.3	49.6	37.7
	% 80 YFC	76.2	57.5	56.8	51.9	31.6	22.1
450	Şahit	85.7	84.2	71.0	70.2	50.5	45.3
	% 20 YFC	90.1	85.4	82.3	73.6	56.2	38.9
	% 40 YFC	91.4	87.2	81.0	71.9	53.4	36.6
	% 60 YFC	92.5	70.0	73.4	61.6	49.1	30.2
	% 80 YFC	77.4	62.1	54.6	44.6	35.0	18.3

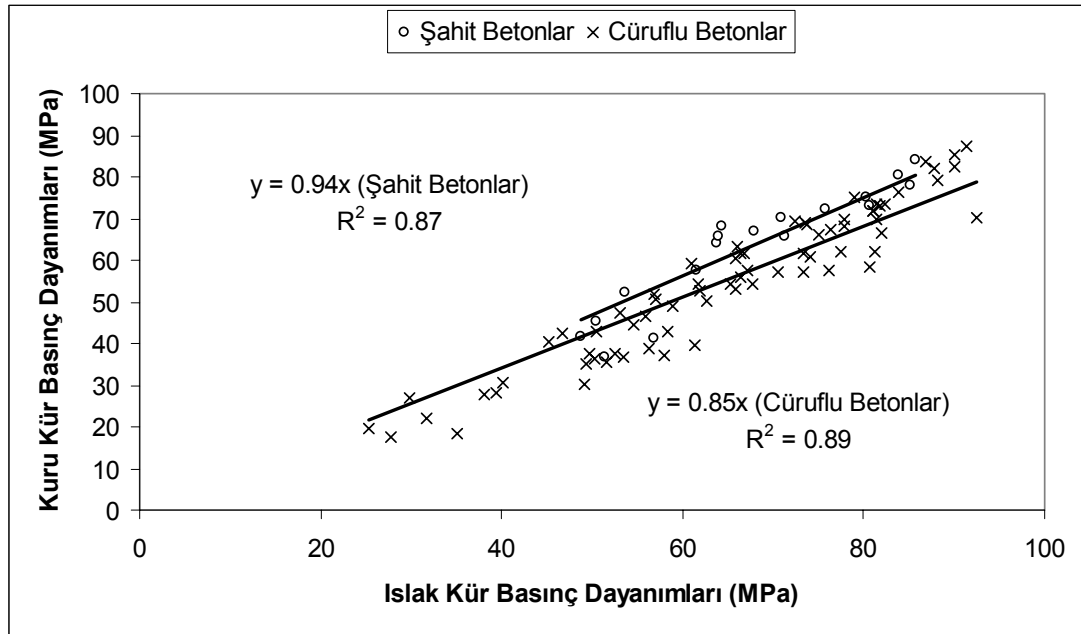
Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'ten, ıslak kür edilen betonların basınç dayanımlarının, kuru küre tabi tutulan betonların basınç dayanımlarından yüksek çıktığı görülmektedir. Bunun muhtemel nedeninin, kuru küre maruz bırakılan betonların hidratasyon için ihtiyaç duydukları kapiler boşluklardaki suyu bünyelerinden yitirmeleri sonucu tam hidrate olamamalarıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Su/bağlayıcı oranındaki artışla birlikte genel olarak kuru kür sonucu ortaya çıkan dayanım düşmesi daha da artmaktadır. Bu durum hem şahit hem de cüruf içeren betonlar için de geçerli olup, meydana gelen düşüşün miktarı cürufllu betonlarda daha fazla olmaktadır.

Çizelge 4.15'te ise, kuru ve ıslak ortamda kür edilen betonların basınç dayanımlarının birbirlerine oranları, 28 ve 90. günler için verilmektedir. Çizelgeden kuru kür/ıslak kür arasındaki dayanım kayıpları, cüruf içeren betonlar ile şahit betonlar arasında karşılaştırıldığında, genel olarak, cürufllu betonların kontrol betonlarına kıyasla, kür şartlarına karşı daha hassas olduğu ve bu tip betonların daha iyi kür edilmeleri gerektiği sonucu çıkarılabilir.

Çizelge 4.15. 28 ve 90 gün için farklı kür edilen betonların basınç mukavemetleri oranı

Çimento dozajı (kg/m ³)	Cüruf oranı	28. Gün			90. Gün		
		Kuru kür/Islak kür			Kuru kür/Islak kür		
		S/B Oranı			S/B Oranı		
		0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50
350	Şahit	95.5	100	97.6	95.6	92.0	93.7
	% 20 YFC	90.0	91.8	88.8	96.5	93.1	82.7
	% 40 YFC	88.9	85.7	83.2	93.4	88.1	80.4
	% 60 YFC	78.0	85.1	89.6	76.6	82.4	73.6
	% 80 YFC	80.1	84.7	90.0	80.9	83.5	72.4
400	Şahit	90.6	102.7	71.8	91.7	98.8	72.9
	% 20 YFC	85.5	95.6	71.3	91.3	95.6	64.2
	% 40 YFC	81.1	92.1	68.6	89.9	89.7	64.2
	% 60 YFC	87.7	96.6	76.1	94.8	88.3	76.0
	% 80 YFC	80.4	88.9	77.9	75.5	91.4	69.9
450	Şahit	93.4	106.1	85.6	98.2	98.9	89.7
	% 20 YFC	89.5	94.0	72.0	94.8	89.4	69.2
	% 40 YFC	91.2	92.9	71.2	95.4	88.8	68.5
	% 60 YFC	72.2	87.7	71.6	75.7	83.9	61.5
	% 80 YFC	84.5	91.0	63.5	80.2	81.7	52.3

Kuru ve ıslak kür arasında herhangi bir ilişki olup olmadığı istatistiksel olarak araştırılmış, kuru kür ve ıslak kür sonucu elde edilen beton basınç dayanımları arasında doğrusal bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Bu ilişki cüruf içeren ve içermeyen betonlar için ayrı ayrı aranmış olup, ilişkiler Şekil 4.5'te sunulmuştur. Şekilden, cüruf katkılı ve katkısız betonlar için kuru kür ve ıslak kür sonucu elde edilen beton basınç dayanımları arasında kuvvetli bir doğrusal ilişki olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. Kuru ve ıslak kür şartlarında elde edilen betonların basınç mukavemeti ilişkisi

Şekil 4.5, %100 bağıl neme sahip ideal bir ortamda kür edilen cüruf katkılı betonların, %65 bağıl nemdeki kuru kürüne tabi tutulması sonucunda, basınç dayanımlarında %15 düşüş meydana geleceğini göstermektedir. Şahit betonların kür farkından kaynaklan kayıp miktarları ise yalnızca %6 mertebesinde. Bir başka deyişle, %100 bağıl nemde kür edilen cüruf betonunun basınç dayanımı, ortalama 0.85 ile çarpılarak %65 bağıl nemde kür edilen cüruf betonunun basınç dayanımı tahmin edilebilirken buna karşılık, %100 bağıl nemde kür edilen şahit betonunun basınç dayanımı ortalama 0.94 ile çarpılarak %65 bağıl nemde kür edilen şahit betonunun basınç dayanımı tahmin edilebilmektedir. Bu durumda şahit beton için

ortalama 0.94 olan katsayı, cüruf için 0.85'e düşmektedir. Görüldüğü gibi, cüruf katkılı betonlar, kuru kür şartlarından, Ramezaniyanpour ve Malhotra (1995)'nin da belirttikleri gibi, daha fazla etkilenmektedir.

Puzolan içeren betonların puzolan içermeyen betonlara göre kuru kür şartlarından daha fazla etkilenmesinin esas nedenini bulmak için puzolanların tarifine bakmak yeterli olacaktır. Puzolanlar, “kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve nemli ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler” olarak tanımlanmaktadır (ASTM C 125, 1994; ASTM C 618, 1994; Erdoğan, 2003). Bu tanımdan, puzolanların bağlayıcılık özelliklerini sergileyebilmeleri için sulu ortam ve kalsiyum hidroksite gereksinim duydukları anlaşılmaktadır. Kalsiyum hidroksit Portland çimentosunun ana bileşenleri olan C_2S ve C_3S 'nin hidratasyonu sonucunda ortamda mevcuttur. Ortamda bulunacak olan su ise, kuru kür şartlarından dolayı kurumaya başladığı zaman puzolanın bağlayıcılık özelliğini göstermesine engel olacağından, kuru kür şartları puzolan içeren betonları puzolan içermeyen betonlara göre daha fazla etkileyecektir (Atiş ve ark., 2003; Atiş ve ark., 2005).

4.2. Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneyler ve Sonuçları

Bu kısımda, cüruf içeren ve içermeyen harç karışımları üzerinde gerçekleştirilen yayılma tablası deney sonuçları ile birlikte, ıslak ve kuru kür olmak üzere iki farklı kür ortamına maruz bırakılmış sertleşmiş harç karışımları üzerinde yürütülen basınç dayanımı, eğilme çekme dayanımı, aşınma, karbonatlaşma, kılcal su emme, rötre, boşluk oranı ve su emme deneylerinden elde edilen sonuçlar tartışılarak sunulmuştur.

4.2.1. Yayılma Tablası Deneyleri

Harç karışımların kıvamını belirlemede uygulama kolaylığı ve gerçek kıvamı en iyi şekilde belirtmesi bakımından Yayılma Tablası (Flow Test) yöntemi kullanılmıştır. Düşük su/bağlayıcı oranlarındaki harçlarda işlenebilirliği kolaylaştırmak amacıyla, yapılan yayılma tablası deneylerine göre yayılmanın 20 ± 1 cm arasında olmasını sağlayacak şekilde değişen dozajlarda hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmış, karışımların kıvamları bu değer etrafında eşitlenmeye çalışılmıştır. Yayılma tablası deneyi için araştırma kapsamında hazırlanan karışımlar, yayılma tablasının kalıbına iki aşamada ve her tabakaya tokmak ile 10 vuruş yapılarak yerleştirildikten sonra harcın üst yüzeyi düzeltilip kalıp çekilmiştir. Yayılma tablası üzerindeki harcın 1.25 cm yükseklikten 15 saniyede 15 defa düşürülmesinin ardından yayılan taze harcın çapı iki ayrı noktadan ölçülerek ortalaması alınmıştır. Bu durumda, deney sonucundaki çap (D_s) ve deneye başlamadan önceki çap ise (D_i) ile gösterildiğinde taze harca ait kıvam değeri;

$$\frac{D_s - D_i}{D_i} \times 100 \quad (4.1)$$

formülü ile hesap edilmiştir.

Araştırma kapsamındaki harçlara ait yayılma değerleri ve kullanılan akışkan miktarı Çizelge 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Harç karışımlarının ortalama yayılma değerleri (cm) ve kullanılan akışkan miktarları (%)

S/B \ YFC	Şahit	%20	%40	%60	%80
0.30	20 (%6)	19 (%3.5)	20 (%1)	20 (%0.7)	19 (%0.3)
0.40	19 (%0.3)	20 (%0.1)	20 (%0.1)	19 (%0.1)	20 (%0.13)
0.50	20 (%0)	21 (%0)	22 (%0)	21 (%0)	20 (%0)

Çizelgeden de görüldüğü üzere, artan su/bağlayıcı oranı, karışıma giren su miktarına bağlı olarak, kullanılan akışkan miktarlarını azaltmaktadır. En çok akışkan, 0.30 su/bağlayıcı oranındaki şahit grupta kullanılmış olup 0.50 su/bağlayıcı oranındaki harçlarda ise hiç akışkan kullanılmamıştır. Karışımlarda kullanılan su miktarının her bir su/bağlayıcı oranında sabit kalması ve cüruf ikame oranının değişmesinden dolayı yayılma miktarlarının sabit bir değer etrafında toplanması ancak kullanılan akışkan miktarlarında değişim yapmakla mümkün olmuştur. Öte yandan sabit bir su/bağlayıcı oranında artan cüruf ikame oranı, kullanılacak akışkan dozajlarında da bir düşüş meydana getirmektedir. 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı oranındaki harçlarda %80’e kadar artan cüruf ilavesi, yayılmayı olumlu yönde etkilerken, 0.40 su/bağlayıcı oranında %80 cüruf ilavesi sabit bir yayılma değeri için akışkan ihtiyacını önemsiz miktarda arttırmıştır. Öte yandan 0.50 su/bağlayıcı oranındaki harçlara, %20 ve %40 cüruf ilaveleri yayılma değerlerine artış yönünde olumlu bir katkı sağlarken, %60 ve %80 cüruf ilaveleri yayılmayı daha fazla etkilememiş ve elde edilen yayılma değerleri ise sırasıyla 21 ve 20 cm olmuştur. Görüldüğü üzere, artan cüruf katkısı özellikle düşük su/bağlayıcı oranındaki harçlarda işlenebilirliği arttırmakta ve ihtiyaç duyulan katkı dozajında bir miktar azalma sağlamaktadır. Tokyay (2003)’ın da bildirdiği gibi, granüle yüksek fırın cüruflarının klinkere göre daha az yüzey pürüzlülüğüne ve daha düşük özgül ağırlığa sahip olması, hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesine olanak sağlayacağından, betona ilave edilen cüruf işlenebilirliği arttırmaktadır.

4.2.2. Harç Numune Basınç Mukavemetleri

Islak ve kuru olmak üzere iki ayrı ortamda kür edilmiş cüruf katkılı harç numunelerin 7, 28, 90 ve 180 gün gibi belirli zaman dilimlerinde elde edilen basınç dayanımları 0.30 su/bağlayıcı oranı için Çizelge 4.17’de verilmiştir.

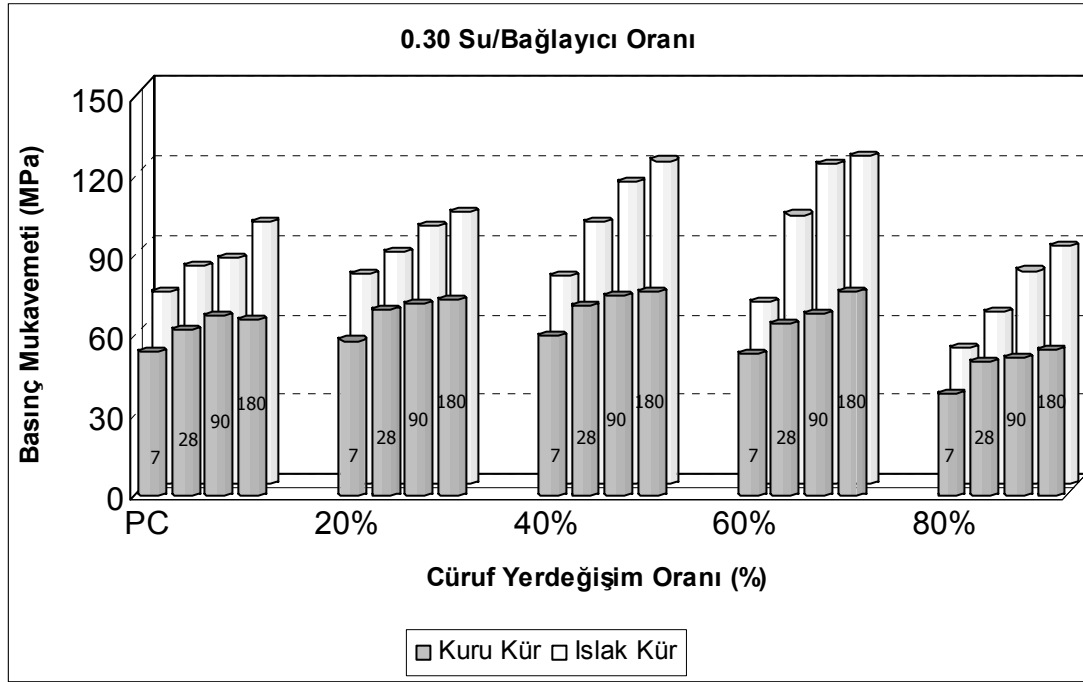
Çizelge 4.17. 0.30 S/B oranındaki harçların basınç mukavemeti (MPa)

	7. Gün		28. Gün		90. Gün		180. Gün	
	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
H0.30-00	71.8	54.4	81.6	62.5	84.4	67.4	97.8	66.1
H0.30-20	78.3	58.3	86.9	69.8	96.5	72.1	102.1	73.7
H0.30-40	77.8	60.0	97.8	71.4	113.3	75.0	121.0	76.8
H0.30-60	68.1	53.4	100.8	64.9	120.2	68.3	122.8	76.6
H0.30-80	50.5	38.1	64.5	50.3	79.7	51.8	89.1	55.0

Bilindiği gibi, çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların sağlıklı bir şekilde devam edebilmesi, kapiler boşluklardaki suyun buharlaşma ya da sıcaklık gibi nedenlerle kaybolmaması ile mümkündür. Çizelge 4.17 incelendiğinde, ıslak kür edilen numunelerin kuru kür edilen numunelere göre daha fazla dayanım gelişimi gösterdiği görülmektedir. Bu durumun, kuru küre maruz bırakılan harçların kapiler boşluklarındaki suyu kaybetmeleri sonucu tam hidrate olamamalarıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Öte yandan devam eden hidratasyon olayları neticesinde, bağlayıcı madde hamurunun yapısındaki hidrate elemanların miktarı da artmakta ve harç numuneler zaman içerisinde mukavemet kazanmaya devam etmektedir. Çizelgeden, ıslak kür edilmiş karışımlar için, 28. günden itibaren, artan cüruf ikame oranıyla birlikte dayanımlarda da bir artışın olduğu ancak %80 cüruf ilavesinde ise durumun tersine dönerek dayanımlarda düşüşlerin başladığı göze çarpmaktadır.

0.30 su/bağlayıcı oranına sahip harç karışımları için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi ise Şekil 4.6’da verilmiştir. Şekilden, her iki kür durumunda da %20 ve %40 cüruf katkılı harçların 7. günden itibaren şahitlerinden daha yüksek dayanım geliştirdiği, 28. gün ve daha sonrasında ise %60 cüruf katkı karışımların da iyi bir performans göstererek şahitlerine göre daha yüksek dayanımlara ulaştığı

görülmektedir. Öte yandan, 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı oranında, ıslak kür edilmiş ve oldukça yüksek ikame oranına sahip olan %80 cüruf katkılı karışımların bile 90 ve daha sonraki günlerde şahitlerine yakın dayanımlar geliştirdiği gözlenmiştir.



Şekil 4.6. 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi

Islak ve kuru kür edilmiş 0.40 su/bağlayıcı oranındaki harç karışımları için belirli zaman dilimlerinde elde edilen basınç mukavemetleri Çizelge 4.18’de verilmiştir.

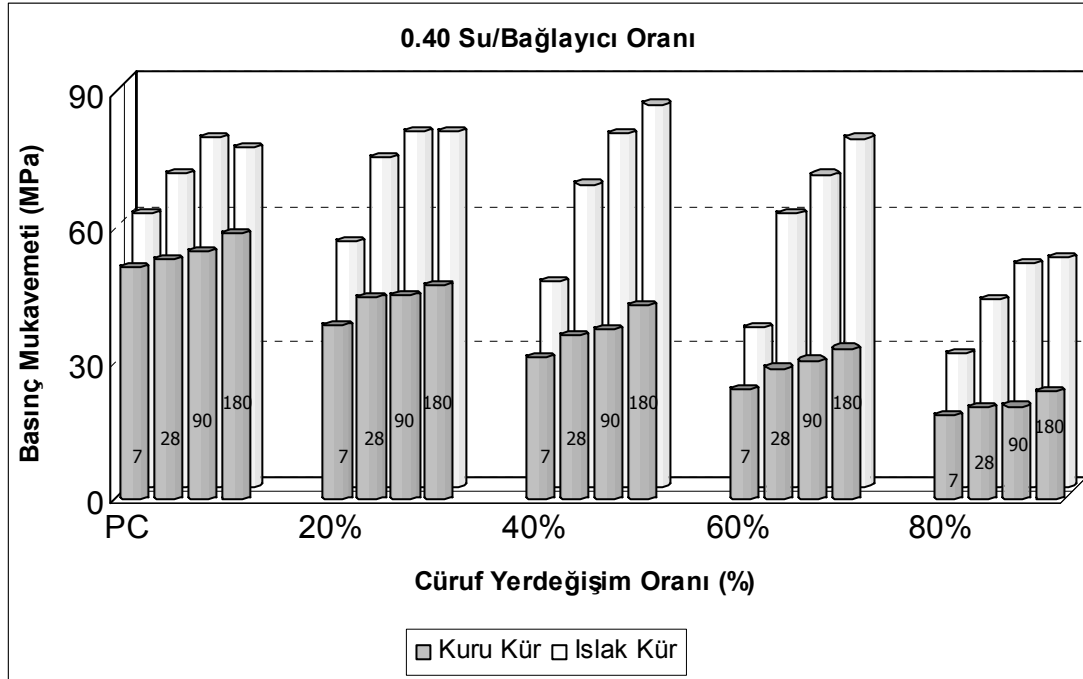
Çizelge 4.18. 0.40 S/B oranındaki harçların basınç mukavemeti (MPa)

	7. Gün		28. Gün		90. Gün		180. Gün	
	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
H0.40-00	60.4	51.5	69.3	53.2	77.1	55.0	74.9	58.9
H0.40-20	54.1	38.4	72.7	44.5	78.6	45.2	78.4	47.5
H0.40-40	45.3	31.6	66.8	36.2	77.9	37.6	84.5	42.8
H0.40-60	35.2	24.5	60.4	29.0	68.9	30.8	76.9	33.4
H0.40-80	29.4	18.7	41.3	20.3	49.2	20.6	50.5	23.8

Çizelgeden de anlaşıldığı gibi, ıslak kür edilen numuneler kuru kür edilen numunelere göre daha fazla dayanım geliştirmiş olup, 0.40 su/bağlayıcı oranındaki karışımların basınç mukavemeti değerleri, 0.30 su/bağlayıcı oranındaki karışımlar için elde edilen dayanımlardan düşük olmuştur. Öte yandan geçen zamanla birlikte tüm karışımların mukavemet değerlerinde bir artış olduğu açıkça görülmektedir. Islak kür edilmiş harçlar için cüruf katkılı karışımların şahitlerine oranları, zamanla artarak 7. günde %49-90, 28. günde %60-105, 90. günde %64-102 ve 180. günde %67-113 arasında yer almıştır. Kuru kür edilmiş cüruf katkılı harçların şahitlerine oranları ise yine zamanla artmakta ancak ıslak kürdekine kıyasla oldukça düşük olmaktadır.

Kuru kür edilen harç karışımları, bütün yaşlar için, artan cüruf ikame oranından olumsuz etkilenmekte ve cüruf oranının artması sonucu kür şartlarının karışımlar üzerindeki olumsuz etkisi, su/bağlayıcı oranının 0.30'dan 0.40'a yükselmesiyle daha da belirgin olmaktadır. Örneğin, kuru kür edilmiş harçlar için %20 cüruf katkılı karışımın şahidine göre 7. gündeki dayanım kaybı %25 iken, %40 cüruf katkılı karışımında bu değer %39'a çıkmıştır. Islak kür edilmiş harçlarda ise, bu oranlar daha az olup %20 ve %40 cüruf katkılı harçlar için sırasıyla %10 ve %25'tir.

0.40 su/bağlayıcı oranına sahip harç karışımları için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi ise Şekil 4.7'de verilmiştir. Ramezaniyanpour ve Malhotra (1995)'nin da bildirdiği gibi, cüruf ya da uçucu kül içeren betonlar, kontrol betonlarına kıyasla, kür şartlarına karşı daha hassas olup, bu tip betonların daha iyi kür edilmesi gerekmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, kuru kür edilmiş cüruf katkılı harçların dayanımları, 0.30 su/bağlayıcı oranındakilerden farklı olarak, bütün yaşlar için şahitlerinden daha düşük olmuş ve kuru kür ortamı, cüruf harçları normal Portland çimentosuyla üretilen şahitlerine göre daha fazla etkilemiştir. Islak kürde ise, cüruf katkılı harçların 7. gündeki dayanımları şahitlerinden daha düşük olmasına rağmen, %20 cüruf katkılı karışım 28. günde, %40 cüruf katkılı karışım 90. günde ve %60 cüruf katkılı karışım ise 180. günde şahide kıyasla daha fazla dayanım geliştirmiştir. Cüruf ikame oranı %80 olan karışımların ise tüm zaman dilimlerinde elde edilen dayanımları da, şahitlerinden daha az olmuştur.



Şekil 4.7. 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi

Islak ve kuru kür edilmiş 0.50 su/bağlayıcı oranındaki harç karışımları için belirli zaman dilimlerinde elde edilen basınç mukavemetleri Çizelge 4.19'da verilmiştir.

Çizelge 4.19. 0.50 S/B oranındaki harçların basınç mukavemeti (MPa)

	7. Gün		28. Gün		90. Gün		180. Gün	
	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
H0.50-00	46.6	36.4	62.1	40.8	67.0	40.4	67.6	41.9
H0.50-20	37.1	28.7	53.8	31.1	70.8	33.6	71.2	35.5
H0.50-40	27.8	21.7	53.0	29.9	65.3	28.4	68.8	30.2
H0.50-60	19.6	15.6	39.4	20.6	53.9	22.0	39.4	24.8
H0.50-80	15.6	10.3	27.2	12.6	30.1	13.8	31.5	10.9

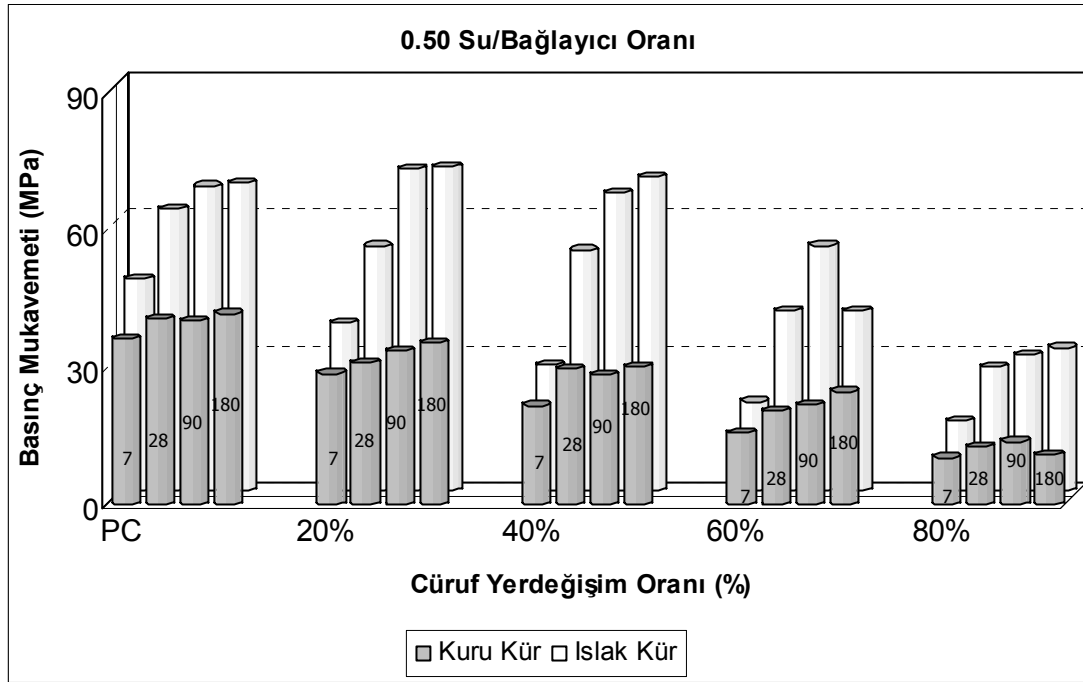
Çizelgeden, su/bağlayıcı oranının 0.50'ye yükselmesi ile diğer su/bağlayıcı oranlarına göre basınç dayanımlarında gözle görülür bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Öte yandan geçen zamanla birlikte tüm karışımların mukavemet değerlerinde bir artış olmuş ve ıslak kür edilen numuneler kuru kür edilen

numunelere göre daha fazla dayanım geliştirmiştir. Şahitleri ile kıyaslandığında, yüksek ikame yüzdelerine sahip cüruf lu harçlarda dayanımlar, artan su/bağlayıcı oranı ile birlikte daha belirgin bir şekilde düşmüş, ıslak kür edilmiş %80 cüruf ikameli harç karışımı ele alındığı zaman, 28. günde meydana gelen düşüş miktarları 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranları için sırasıyla %21, %40 ve %56 olmuştur. Kuru kür maruz bırakılmış harçlarda ise artan su/bağlayıcı oranıyla meydana gelen bu kayıp miktarları daha da fazla olup yine %80 cüruf katkılı harç karışımı ele alındığında 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarındaki düşüşler sırasıyla %20, %62 ve %69 olmuştur.

Su/bağlayıcı oranı yüksek olan cüruf katkılı betonların mukavemet gelişimleri yavaş olmakla birlikte, normal bakım koşullarında cüruf un beton basınç dayanımına olumlu etkisi, düşük su/bağlayıcı oranındaki cüruf lu betonlara göre ilerleyen yaşlarda kendini göstermektedir. Çizelge 4.19'dan da görüldüğü gibi, 0.50 gibi yüksek su/bağlayıcı oranındaki ıslak kür edilmiş cüruf katkılı karışımlar, 0.30 ve 0.40 su/bağlayıcı oranlarındakilerin aksine ancak 90. günde şahitlerini yakalayabilmektedir. Su/bağlayıcı oranı 0.50 olan ıslak kür edilmiş harçlar için cüruf katkılı karışımların, şahitlerine oranları 0.30 ve 0.40 su/bağlayıcı oranlarındakilerden düşük bir şekilde 7. günde %33-80, 28. günde %44-87, 90. günde %45-106 ve 180. günde %47-105 arasında olmuştur. Kuru kür edilmiş cüruf katkılı harçların şahitlerine oranları ise ıslak kürdekilere göre oldukça düşük olup 7. günde %28-79, 28. günde %31-76, 90. günde %34-83 ve 180. günde %26-85 arasında yer almaktadır.

0.50 su/bağlayıcı oranına sahip harç karışımları için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi ise Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, kuru kür edilmiş cüruf katkılı harçların dayanımları, bütün yaşlar için şahitlerinden daha düşük olmuş ve cüruf katkılı harçlar, normal Portland çimentosuyla üretilen şahitlerine göre kuru kür ortamından diğer su/bağlayıcı oranlarındakilere göre daha fazla etkilenmiştir. Islak kürde ise, %20 ve %40 cüruf katkılı harçlar 28. günde şahitlerine yaklaşımlarına rağmen 0.50 gibi yüksek su/bağlayıcı oranından dolayı %20 cüruf katkılı karışım ancak 90. günde, %40 cüruf katkılı karışım da 180. günde şahitlerinden yüksek dayanım geliştirebilmiştir. Cüruf ikame oranları %60 ve %80

olan karışımların ise tüm zaman dilimlerinde elde edilen dayanımları da yüksek su/bağlayıcı oranından etkilendiği için şahitlerinden daha az olmuştur.



Şekil 4.8. 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için basınç mukavemeti-ikame oranı ilişkisi

Çalışma kapsamındaki harçlardan elde edilen sonuçlara göre, ıslak kür edilmiş harçlar, kuru kür edilmiş harçlara göre daha yüksek basınç dayanımları sergilemiştir. Karışımındaki cüruf oranının artmasıyla birlikte kuru kür şartlarının etkisi daha da belirgin olmakta, bunun yanı sıra kuru kür şartları, yüksek su/bağlayıcı oranına sahip harçları daha fazla etkilemektedir.

Öte yandan, cürufun hidratasyonu Portland çimentosuna göre daha yavaş olduğundan, artan su/bağlayıcı oranı, özellikle yüksek yer değişim oranlarındaki cüruf katkılı harçların mukavemet gelişimlerini olumsuz yönde etkilemekte ve dayanım gelişimlerini geciktirerek şahitlerine yaklaşım oranlarında düşüşler meydana getirmektedir.

Harçların 28 günlük basınç mukavemetleri göz önüne alındığında, optimum su/bağlayıcı oranının 0.30 olduğu, yüksek mukavemet değerlerinin elde edilmesinde ise optimum cüruf ikame oranının %40-60 arasında yer aldığı gözlenmiştir.

4.2.2.1. Harç Numunelerin 28 Günlük Şahit Numune Dayanımlarına Göre Bağlı Dayanımları

Islak kür edilen harç numunelerin çeşitli yaşlardaki mukavemetleri, kendi su/bağlayıcı oranındaki şahit numunenin 28 günlük basınç mukavemetlerine bölünmek suretiyle 28 günlük basınç mukavemetlerinin bir yüzdesi olarak Çizelge 4.20’de sunulmuştur.

Çizelge 4.20. Islak kür edilen harçların 28 günlük şahit numune dayanımlarına göre bağlı dayanımları (%)

S/B Oranı	Cüruf oranı	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün
0.30	Şahit	88.0	100	103.4	119.9
	%20 YFC	96.0	106.5	118.3	125.1
	%40 YFC	95.3	119.9	138.8	148.3
	%60 YFC	83.5	123.5	147.3	150.5
	%80 YFC	61.9	79.0	97.7	109.2
0.40	Şahit	87.2	100	111.3	108.1
	%20 YFC	78.1	104.9	113.4	113.1
	%40 YFC	65.4	96.4	112.4	121.9
	%60 YFC	50.8	87.2	99.4	111.0
	%80 YFC	42.4	59.6	71.0	72.9
0.50	Şahit	75.0	100	107.9	108.9
	%20 YFC	59.7	86.6	114.0	114.7
	%40 YFC	44.8	85.3	105.2	110.8
	%60 YFC	31.6	63.4	86.8	63.4
	%80 YFC	25.1	43.8	48.5	50.7

Çizelge 4.20’de, tüm su/bağlayıcı oranları dahil, cürufli harç dayanımlarının şahit dayanımlarına oranları zamanla artarak, 0.30 su/bağlayıcı oranı için 7. günde %62-96, 28. günde %79-124, 90. günde %98-147 ve 180. günde %109-151 civarında olmuştur. 0.40 su/bağlayıcı oranına bakıldığında ise cürufli karışımların şahitlerini yakalama oranları 7. gün için %42-78, 28. gün için %60-105, 90. gün için %71-113 ve 180. gün için de %73-122 arasında değişmiştir. Su/bağlayıcı oranının 0.50’ye yükselmesi durumunda cüruf katkılı karışımların şahit karışımları yakalama oranları ise 7. günde %25-60, 28. günde %44-87, 90. günde %49-114 ve 180. günde %51-115 arasında olmuştur. Ayrıca, su/bağlayıcı oranının artmasıyla cürufli numunelerin 28

günlük şahit numune basınç dayanımlarına yaklaşma değerlerinde doğal olarak bir düşüş meydana gelmiştir.

Kuru kür edilen harçların 28 günlük şahit numune dayanımlarına göre bağlı dayanımları ise yüzde olarak Çizelge 4.21’de sunulmuştur.

Çizelge 4.21. Kuru kür edilen harçların 28 günlük şahit numune dayanımlarına göre bağlı dayanımları (%)

S/B Oranı	Cüruf oranı	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün
0.30	Şahit	87.0	100	107.8	105.8
	%20 YFC	93.3	111.7	115.4	117.9
	%40 YFC	96.0	114.2	120.0	122.9
	%60 YFC	85.4	103.8	109.3	122.6
	%80 YFC	61.0	80.5	82.9	88.0
0.40	Şahit	96.8	100	103.4	110.7
	%20 YFC	72.2	83.6	85.0	89.3
	%40 YFC	59.4	68.0	70.7	80.5
	%60 YFC	46.1	54.5	57.9	62.8
	%80 YFC	35.2	38.2	38.7	44.7
0.50	Şahit	89.2	100	99.0	102.7
	%20 YFC	70.3	76.2	82.4	87.0
	%40 YFC	53.2	73.3	69.6	74.0
	%60 YFC	38.2	50.5	53.9	60.8
	%80 YFC	25.2	30.9	33.8	26.7

Çizelge 4.21’den de görüldüğü gibi, cürufli harç dayanımlarının, şahit dayanımlarına oranları zamanla artmakta ve artan su/bağlayıcı oranı, cüruf katkılı numunelerin 28 günlük şahit numune basınç dayanımlarına yaklaşma oranlarında düşüşler meydana getirmektedir. Öte yandan, kuru küre maruz bırakılan cürufli harç numunelerin, 28 günlük şahit numune dayanımlarını yakalama oranları ıslak kürdekinden daha az olmuştur. Kuru kür edilen harçların 28 günlük şahit numune dayanımlarına göre bağlı dayanımları 0.30 su/bağlayıcı oranı için 7. günde %61-93, 28. günde %80-114, 90. günde %83-120 ve 180. günde %88-123 civarında olmuştur. 0.40 su/bağlayıcı oranına bakıldığında ise cürufli karışımların şahitlerini yakalama oranları 7. gün için %35-72, 28. gün için %38-84, 90. gün için %39-85 ve 180. gün için de %45-89 arasında değişmiştir. Su/bağlayıcı oranının 0.50’ye yükselmesiyle cüruf katkılı karışımların şahit karışımları yakalama oranları ise 7. günde %25-70, 28. günde %31-76, 90. günde %34-82 ve 180. günde %27-87 arasında olmuştur.

4.2.2.2. Kür Şartlarının Harç Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi

Kür şartlarının cüruf içeren ve içermeyen numunelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemek üzere, kuru ortamda kür edilen numunelerin dayanımları ıslak ortamda kür edilen numunelerin dayanımlarının %'si olarak hesaplanarak Çizelge 4.22'de verilmiştir.

Çizelge 4.22. Kuru kür edilen harçların basınç mukavemetlerinin ıslak kür edilen harçların basınç mukavemetlerine oranı (%)

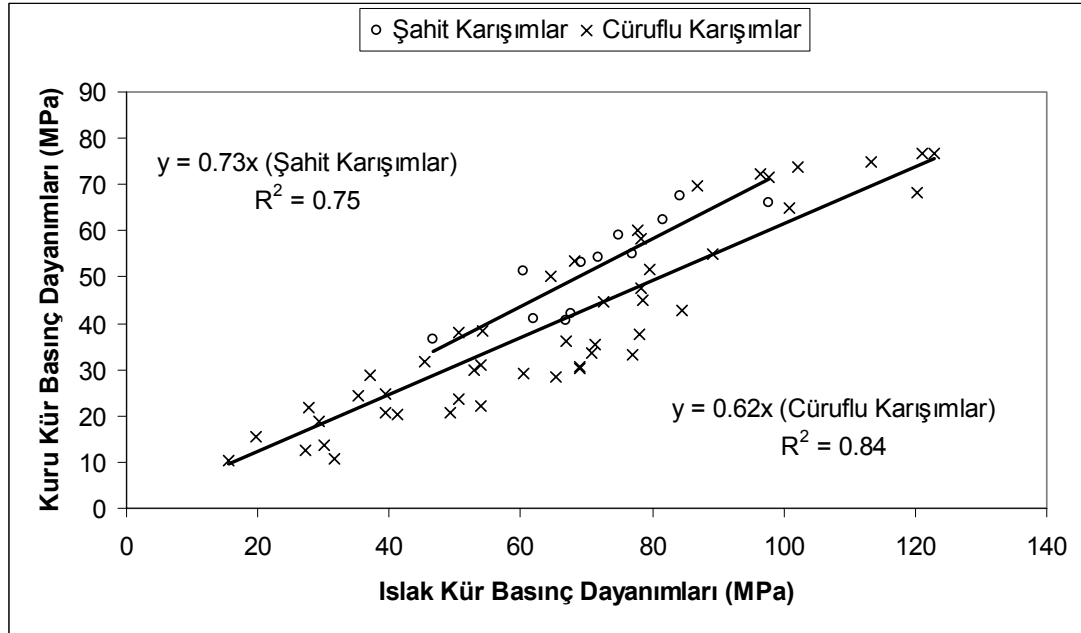
S/B Oranı	Cüruf oranı	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün
0.30	Şahit	75.8	76.6	79.9	67.6
	%20 YFC	74.5	80.3	74.7	72.2
	%40 YFC	77.1	73.0	66.2	63.5
	%60 YFC	78.4	64.4	56.8	62.4
	%80 YFC	75.4	78.0	65.0	61.7
0.40	Şahit	85.3	76.8	71.3	78.6
	%20 YFC	71.0	61.2	57.5	60.6
	%40 YFC	69.8	54.2	48.3	50.7
	%60 YFC	69.6	48.0	44.7	43.4
	%80 YFC	63.6	49.2	41.9	47.1
0.50	Şahit	78.1	65.7	60.3	62.0
	%20 YFC	77.4	57.8	47.5	49.9
	%40 YFC	78.1	56.4	43.5	43.9
	%60 YFC	79.6	52.3	40.8	62.9
	%80 YFC	66.0	46.3	45.8	34.6

Uygulanan kür sıcaklığı ve süresinin özellikle puzolan katkılı çimentoların gelişiminde önemli rol oynadığını bildiren Özer ve Özkul (2004), bu tür çimentoların yetersiz kür şartlarından katkısız çimentolara göre daha fazla etkilendiğini belirtmişlerdir. Çizelgeden de görüldüğü üzere, kuru kür edilen numunelerin basınç dayanımları ıslak kür edilen numunelere göre oldukça düşmüştür.

Islak kür edilen cürufllu numuneler %100 bağıl nemli ortamda dayanım geliştirebilmesine karşın, kuru küre maruz cüruf katkılı numuneler puzolanik reaksiyon için yeterli nemi bulamadıklarından fazla dayanım geliştirememişler ve çizelgeden de görüldüğü gibi kuru kür/ıslak kür oranlarında geçen zamanla birlikte düşüşler meydana gelmiştir. Kür farkından dolayı meydana gelen dayanımlardaki bu düşüşler, cüruf içeren ve içermeyen harçlar arasında karşılaştırıldığında, cürufllu

karışımların şahitlerine kıyasla, kür şartlarına karşı daha hassas olduğu ve bu tip betonların daha iyi kür edilmeleri gerektiği sonucu çıkarılabilir. Ayrıca, ikame oranındaki artışla beraber, kuru kür/ıslak kür oranlarında meydana gelen düşmeler, genel olarak su/bağlayıcı oranındaki artışla birlikte daha da artmakta ve oranlarda görülen bu düşme miktarı, özellikle 0.50 su/bağlayıcı oranındaki numunelerde daha belirgin olup bu numuneler kuru kür şartlarından daha çok etkilenmektedir.

Kür şartlarının cüruf içeren ve içermeyen karışımların basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Kür şartlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi

Şekil 4.9, %100 bağıl neme sahip ideal bir ortamda kür edilen cüruf katkılı harçların basınç dayanımlarında, %65 bağıl nemdeki kuru küre tabi tutulması sonucu %38 düşüş meydana geleceğini göstermektedir. Şahit karışımların kür farkından kaynaklanan kayıp miktarları ise %27'dir. Bir başka deyişle, ıslak kür dayanımlarını kullanarak, kuru kür dayanımlarının bulunmasında, şahit harç karışımı için ortalama 0.73 olan katsayı, cüruf için 0.62'ye düşmektedir. Hidratasyon ısıları Portland çimentolarına göre daha az olduğu için cürufli karışımlar kür şartlarına karşı daha hassas olmakta, bu nedenle daha uzun süreli ve etkili küre ihtiyaç duymaktadırlar.

4.2.3. Harç Numune Eğilme Mukavemetleri

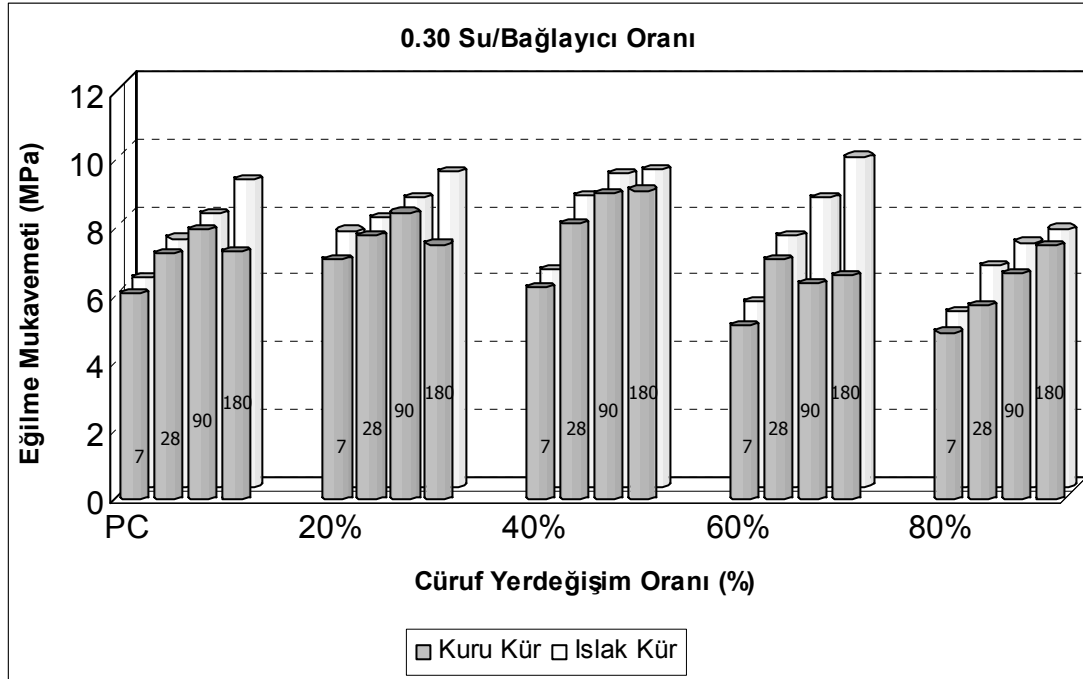
Araştırma kapsamında yer alan ıslak ve kuru kür edilmiş yüksek fırın cürufllu harç numuneleri için 7, 28, 90 ve 180 gün gibi belirli zaman dilimlerinde elde edilen eğilme çekme mukavemeti değerleri 0.30 su/bağlayıcı oranı için Çizelge 4.23'te verilmiştir.

Çizelge 4.23. 0.30 S/B oranındaki harçların eğilmede çekme mukavemeti (MPa)

	7. Gün		28. Gün		90. Gün		180. Gün	
	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
H0.30-00	6.2	6.1	7.3	7.2	8.1	8.0	9.1	7.3
H0.30-20	7.5	7.1	7.9	7.8	8.5	8.5	9.3	7.5
H0.30-40	6.4	6.2	8.6	8.1	9.2	9.0	9.3	9.1
H0.30-60	5.5	5.1	7.4	7.1	8.5	6.4	9.7	6.6
H0.30-80	5.2	4.9	6.5	5.7	7.2	6.7	7.6	7.5

Çizelge 4.23'ten, geçen zamanla birlikte cüruf içeren ya da içermeyen bütün harçların eğilmede çekme dayanımlarında bir artış olduğu, her bir yaş ve ikame oranı için kuru kür edilen numunelerin ıslak kür edilen numunelere göre daha düşük eğilme dayanımları sergiledikleri görülmektedir. Öte yandan, her iki kür durumu için, %20 ve %40 cüruf katkılı harçların 7. gün ve sonrasındaki eğilmede çekme dayanımları, şahit numuneye göre daha yüksek olurken %60 cüruf katkısı 7. gündeki dayanımda bir miktar düşüşe sebep olmuştur. Ancak, ıslak kür durumu için %60 cüruf katkılı harçlar şahit numuneyi 28. günde yakalayarak sonraki günlerde de ondan daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. %80 cüruf katkısı içeren harçlar ise tüm yaşlarda her iki kür durumu için en düşük performansı sergilemişlerdir. Uzun vadede ise en iyi performans, her iki kür durumu için %40 cüruf oranındaki harçlarda gözlenmiştir.

0.30 su/bağlayıcı oranına sahip harç karışımları için eğilmede çekme mukavemeti-ikame oranı ilişkisi Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için eğilmede çekme mukavemeti-ikame oranı ilişkisi

Islak ve kuru kür edilmiş cürufllu harç numunelere ait eğilme çekme mukavemeti değerleri 0.40 su/bağlayıcı oranı için Çizelge 4.24'te verilmiştir.

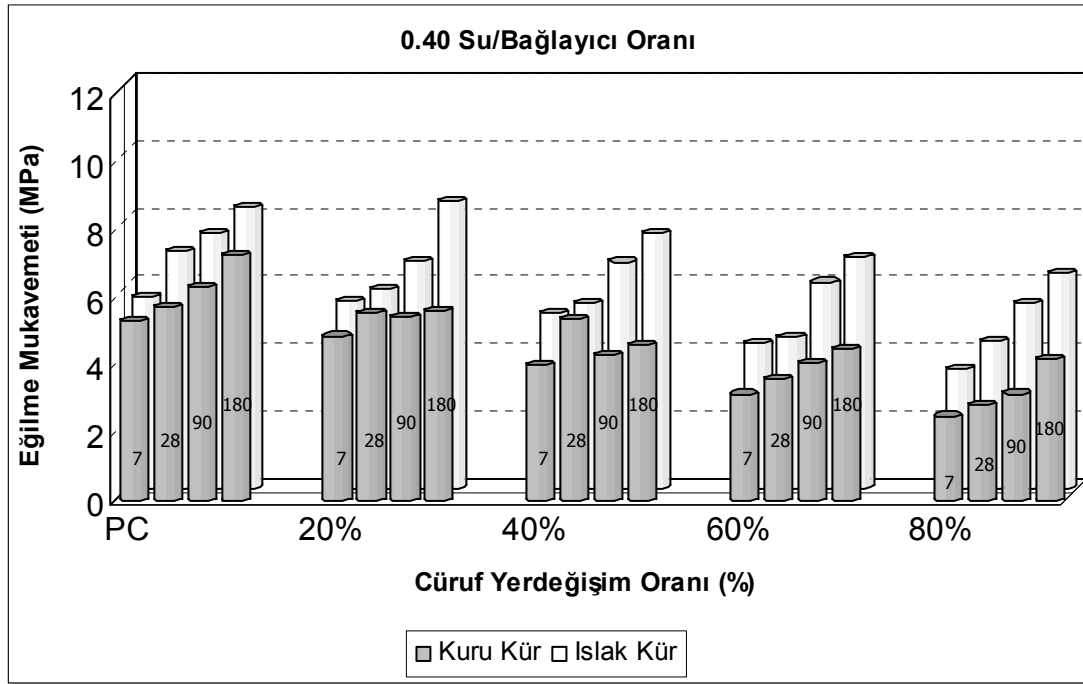
Çizelge 4.24. 0.40 S/B oranındaki harçların eğilmede çekme mukavemeti (MPa)

	7. Gün		28. Gün		90. Gün		180. Gün	
	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
H0.40-00	5.6	5.3	7.0	5.7	7.5	6.3	8.3	7.2
H0.40-20	5.5	4.9	5.9	5.6	6.7	5.4	8.4	5.6
H0.40-40	5.2	4.0	5.5	5.4	6.7	4.3	7.5	4.6
H0.40-60	4.3	3.2	4.5	3.6	6.1	4.1	6.8	4.5
H0.40-80	3.5	2.5	4.3	2.8	5.4	3.2	6.3	4.2

Çizelgeden, ıslak kür edilen numunelerin kuru kür edilen numunelere göre daha yüksek eğilme dayanımları sergiledikleri ve bütün yaşlar için kuru kür edilmiş cüruf katkılı harçların eğilme dayanımlarının, şahitlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Islak kür edilmiş cürufllu harçlar ise genel olarak şahitlerine eşdeğer eğilme dayanımları sergilemiş olmalarına rağmen artan su/bağlayıcı oranı, şahitlerine

yaklaşım oranlarında düşüşler meydana getirmiş ve genel olarak 180. günde şahitlerinden yüksek dayanım geliştirebilmişlerdir.

0.40 su/bağlayıcı oranına sahip harç karışımları için eğilmede çekme mukavemeti-ikame oranı ilişkisi Şekil 4.11’de verilmiştir.



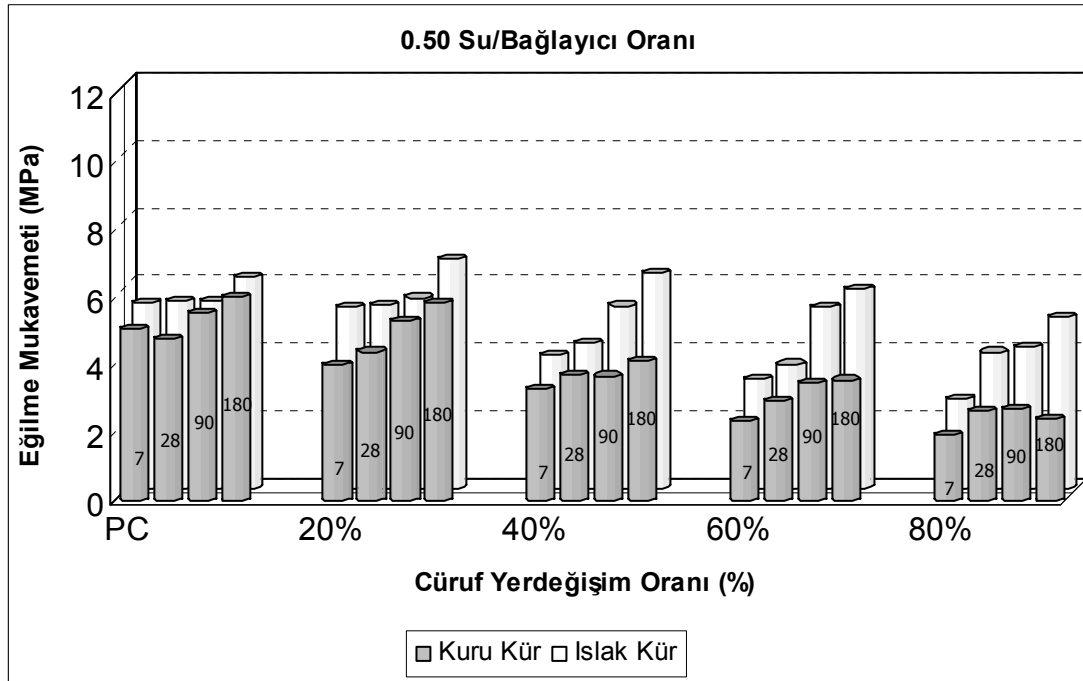
Şekil 4.11. 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için eğilmede çekme mukavemeti-ikame oranı ilişkisi

Her iki kür durumu için 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip cürufli harçların eğilme dayanımları Çizelge 4.25’te sunulmuş olup, çizelgeden de görüldüğü gibi, bütün yaşlar için kuru kür edilmiş cüruf katkılı harçların eğilme dayanımları, şahitlerinden daha düşük olmuştur. Islak kür edilmiş cürufli harçlar ise genel olarak şahitlerine eşdeğer eğilme dayanımları sergilemiş olsalar da artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte cüruf katkısının eğilme dayanımına olumlu etkisinden bahsetmek zorlaşmış, %20 ve %40 cürufli harçlar ancak 180. günde şahitlerinden yüksek dayanım geliştirebilmiştir.

Çizelge 4.25. 0.50 S/B oranındaki harçların eğilmede çekme mukavemeti (MPa)

	7. Gün		28. Gün		90. Gün		180. Gün	
	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
H0.50-00	5.4	5.1	5.5	4.8	5.5	5.5	6.2	6.0
H0.50-20	5.3	4.0	5.4	4.4	5.6	5.3	6.7	5.9
H0.50-40	3.9	3.3	4.3	3.7	5.4	3.7	6.4	4.2
H0.50-60	3.2	2.4	3.7	2.9	5.3	3.5	5.9	3.6
H0.50-80	2.6	1.9	4.0	2.7	4.1	2.7	5.0	2.4

0.50 su/bağlayıcı oranına sahip harç karışımları için eğilmede çekme mukavemeti-ikame oranı ilişkisi Şekil 4.12’de sunulmuştur.

**Şekil 4.12.** 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için eğilmede çekme mukavemeti-ikame oranı ilişkisi

Araştırma kapsamındaki harçlara ait eğilme mukavemetlerinin verildiği çizelgeler ve şekiller arasında 28 günlük eğilme dayanımları göz önüne alınarak bir karşılaştırma yapıldığı takdirde, optimum su/bağlayıcı oranının basınç mukavemetindeki benzer biçimde 0.30 olduğu bulgusuna varılabilir. Öte yandan, cüruf katkılı karışımların şahitlerine nazaran kür şartlarına karşı oldukça hassas

olduğu ve bunun artan su/bağlayıcı oranıyla da iyice belirginleştiği görülmektedir. Yüksek eğilme mukavemeti değerlerinin elde edilmesinde ise optimum cüruf ikame oranının, iyi kür edilmek şartıyla, %40-60 arasında yer aldığı gözlenmiştir.

4.2.3.1. Eğilme Dayanımlarının 28 Günlük Şahit Numune Dayanımı ile Kıyaslanması

Cürufli harçların eğilme dayanımları, kendi su/bağlayıcı oranındaki şahit numunenin 28 günlük eğilme dayanımlarına bölünmek suretiyle 28 günlük eğilme mukavemetlerinin bir yüzdesi olarak ıslak ve kuru kür için sırasıyla Çizelge 4.26 ve Çizelge 4.27’de sunulmuştur. Çizelgelerden de görüldüğü gibi, her iki kür durumu için artan cüruf ikame oranı, 7. gün gibi erken yaştaki cüruf katkılı harçların şahitlerine yaklaşım oranlarında genel anlamda bir düşüş meydana getirmektedir. Ancak, sonraki günlerde devam eden puzolanik reaksiyonların bir sonucu olarak cüruf katkılı harçların şahitlerini yakalama oranlarında artışlar göze çarpmaktadır. Öte yandan, su/bağlayıcı oranının artmasıyla bağlayıcı madde hamurunun kompasitesi azaldığından cürufli numunelerin 28 günlük şahit numune eğilme dayanımlarına yaklaşma değerlerinde de doğal olarak bir düşüş meydana gelmiştir.

Çizelge 4.26. Islak kür edilen harçların eğilme mukavemetlerinin 28 günlük şahit numune eğilme mukavemetine oranı (%)

S/B Oranı	Cüruf oranı	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün
0.30	Şahit	84.9	100	111.0	124.7
	%20 YFC	102.7	108.2	116.4	127.4
	%40 YFC	87.7	117.8	126.0	127.4
	%60 YFC	75.3	101.4	116.4	132.9
	%80 YFC	71.2	89.0	98.6	104.1
0.40	Şahit	80.0	100	107.1	118.6
	%20 YFC	78.6	84.3	95.7	120.0
	%40 YFC	74.3	78.6	95.7	107.1
	%60 YFC	61.4	64.3	87.1	97.1
	%80 YFC	50.0	61.4	77.1	90.0
0.50	Şahit	98.2	100	100	112.7
	%20 YFC	96.4	98.2	101.8	121.8
	%40 YFC	70.9	78.2	98.2	116.4
	%60 YFC	58.2	67.3	96.4	107.3
	%80 YFC	47.3	72.7	74.5	90.9

Çizelge 4.27. Kuru kür edilen harçların eğilme mukavemetlerinin 28 günlük şahit numune eğilme mukavemetine oranı (%)

S/B Oranı	Cüruf oranı	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün
0.30	Şahit	84.7	100	111.1	101.4
	%20 YFC	98.6	108.3	118.1	104.2
	%40 YFC	86.1	112.5	125.0	126.4
	%60 YFC	70.8	98.6	88.9	91.7
	%80 YFC	68.1	79.2	93.1	104.2
0.40	Şahit	93.0	100	110.5	126.3
	%20 YFC	86.0	98.2	94.7	98.2
	%40 YFC	70.2	94.7	75.4	80.7
	%60 YFC	56.1	63.2	71.9	78.9
	%80 YFC	43.9	49.1	56.1	73.7
0.50	Şahit	106.3	100	114.6	125.0
	%20 YFC	83.3	91.7	110.4	122.9
	%40 YFC	68.8	77.1	77.1	87.5
	%60 YFC	50.0	60.4	72.9	75.0
	%80 YFC	39.6	56.3	56.3	50.0

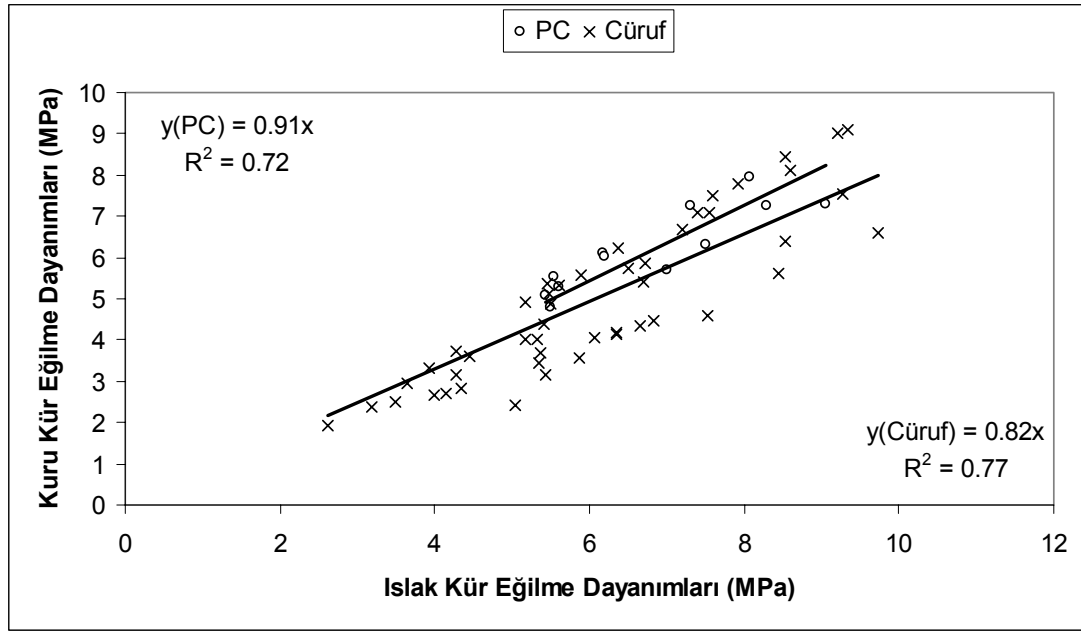
4.2.3.2. Kür Şartlarının Eğilme Mukavemeti Üzerindeki Etkisi

Kür şartlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, kuru kür edilen numunelerin eğilme dayanımları ıslak kür edilen numunelerin eğilme dayanımlarının bir %'si olarak hesaplanmış ve Çizelge 4.28'de verilmiştir.

Çizelge 4.28. Kuru kür edilen harçların eğilme mukavemetlerinin ıslak kür edilen harçların eğilme mukavemetlerine oranı (%)

S/B Oranı	Cüruf oranı	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün
0.30	Şahit	98.4	98.6	98.8	80.2
	%20 YFC	94.7	98.7	100	80.6
	%40 YFC	96.9	94.2	97.8	97.8
	%60 YFC	92.7	95.9	75.3	68.0
	%80 YFC	94.2	87.7	93.1	98.7
0.40	Şahit	94.6	81.4	84.0	86.7
	%20 YFC	89.1	94.9	80.6	66.7
	%40 YFC	76.9	98.2	64.2	61.3
	%60 YFC	74.4	80.0	67.2	66.2
	%80 YFC	71.4	65.1	59.3	66.7
0.50	Şahit	94.4	87.3	100	96.8
	%20 YFC	75.5	81.5	94.6	88.1
	%40 YFC	84.6	86.0	68.5	65.6
	%60 YFC	75.0	78.4	66.0	61.0
	%80 YFC	73.1	67.5	65.9	48.0

Islak kür edilmiş numunelerle kıyaslandığında, kuru küre maruz cüruf katkılı numuneler puzolanik reaksiyon için yeterli nemi bulamadıklarından fazla dayanım geliştirememişler ve çizelgeden de görüldüğü gibi kuru kür edilen numunelerin eğilme dayanımları ıslak kür edilenlere göre oldukça azaldığından kuru kür/ıslak kür oranlarında geçen zamanla birlikte düşüşler meydana gelmiştir.



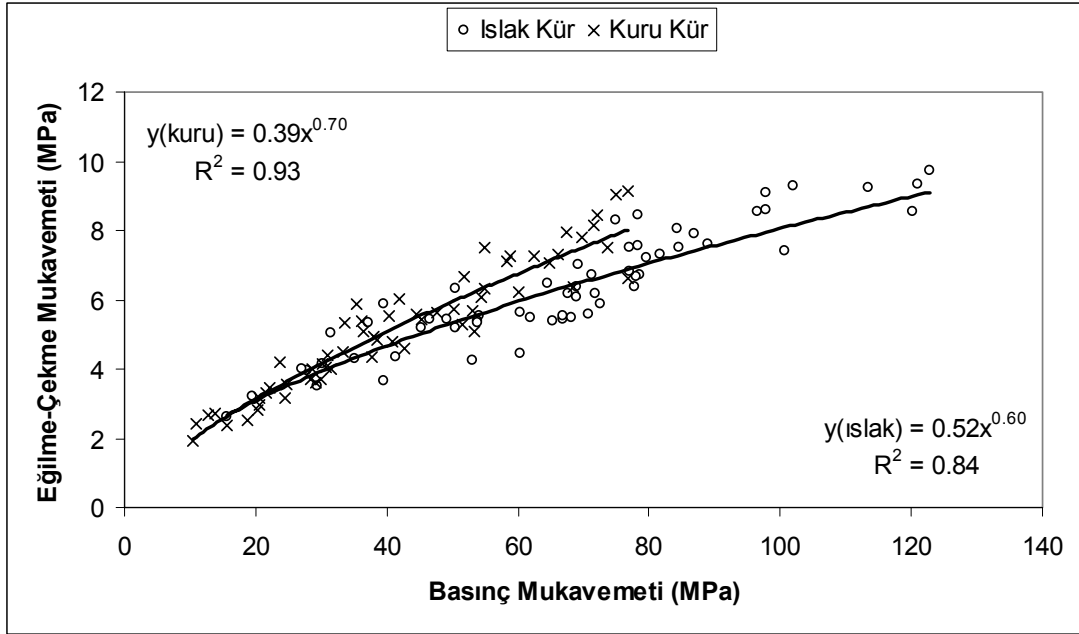
Şekil 4.13. Kür şartlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi

Şekil 4.13, %100 bağıl neme sahip ideal bir ortamda kür edilen harçların eğilme dayanımlarında, %65 bağıl nemdeki kuru küre tabi tutulması sonucu, cüruf lu harçlar için %18, şahit harçlar için de %9 düşüş meydana geleceğini göstermektedir.

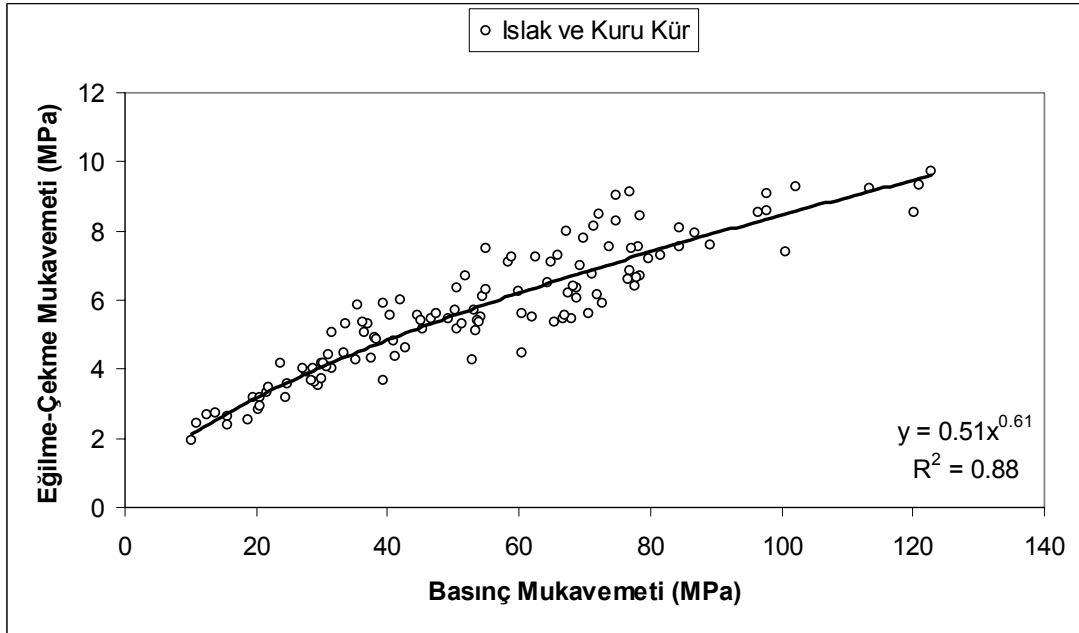
4.2.3.3. Eğilme Mukavemeti ile Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişki

Araştırma kapsamındaki harçların basınç dayanımları ile eğilme dayanımları arasında bir ilişki kurulmuş ve bu ilişki, Şekil 4.14a ve Şekil 4.14b’de gösterilmiştir. Şekil 4.14a’da elde edilen ilişki neticesinde bulunan korelasyon katsayıları, ıslak ve kuru kür edilmiş harçlar için sırasıyla 0.84 ve 0.93 olmuştur. Her iki kür durumu için harç numunelerin eğilme-çekme mukavemetleri ile basınç mukavemetlerinin birlikte verildiği Şekil 4.14b’de ise genel olarak eğrisel bir ilişki kurulmuş ve bu ilişkiye ait

korelasyon katsayısı 0.88 olmuştur. Her iki kür durumunu ifade etmesi bakımından 0.88 korelasyon katsayısı oldukça tatminkar bulunmuştur.



Şekil 4.14a. Islak ve kuru kür edilmiş numunelerin basınç mukavemeti ile eğilme çekme mukavemeti arasındaki ilişki



Şekil 4.14b. Her iki kür durumundaki numunelerin basınç mukavemeti ile eğilme çekme mukavemeti arasındaki ilişki

4.2.4. Harç Numune Aşınma Mukavemeti

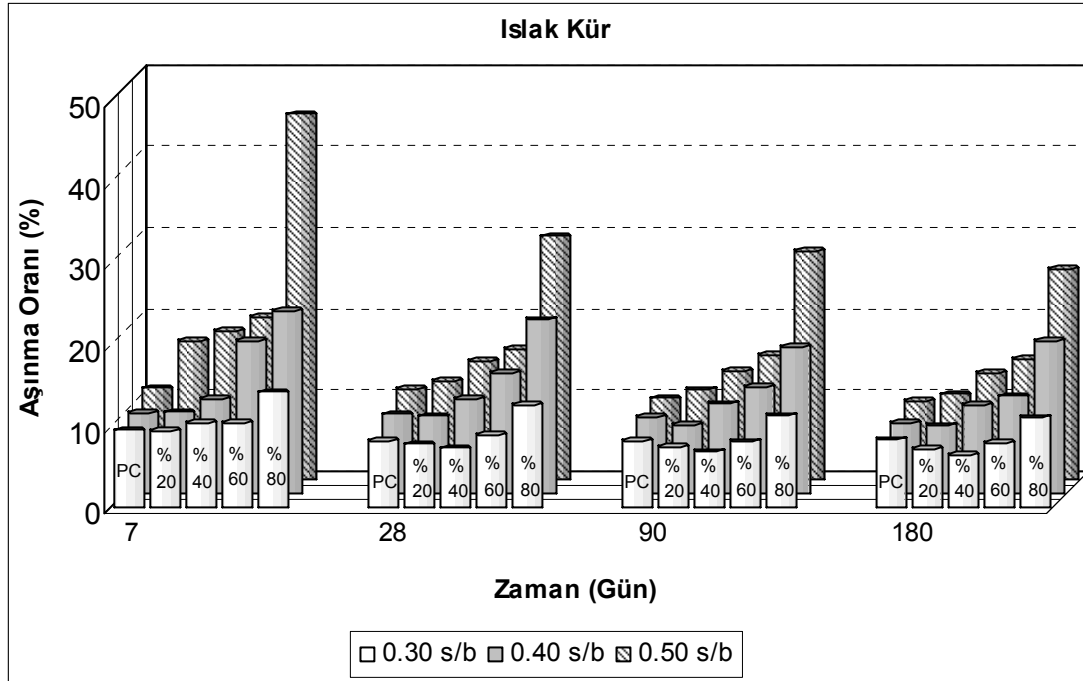
Karayolları, köprü tabliyeleri, havaalanı pistleri gibi trafik yükü altındaki beton yapılar ile su borularında ve genel olarak döşeme kaplamalarında kullanılan betonlar önemli derecede aşınma etkisinde kalır. Bu aşınma; sürtünme, darbe, korozyon ve yorulma gibi etkilerin beton yüzeyinde ayrı ayrı veya birlikte oluşmaları sonucu zamanla meydana gelir. Betonda çimento miktarı agregaya kıyasla az olduğundan asıl aşınma etkisi agregaya gelir. Bu bakımdan beton üretimde aşınmaya dayanıklı sert agregaların kullanılması betonun aşınmaya karşı dayanımını artırır. Genellikle basınç dayanımı yüksek olan betonların aşınmaya karşı da dayanıklı olduğu kabul edilir (Baradan, 2000).

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.

Araştırma kapsamındaki harç numunelerin aşınma değerleri Los Angeles aşınma aleti yardımıyla bulunmuştur. Bulunan ağırlık kayıpları yüzde ağırlık cinsinden hesaplanarak aşınma direnci olarak değerlendirilmiştir. Farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip ıslak kür edilmiş harç numunelerine ait % aşınma değerleri zamana bağlı olarak Çizelge 4.29 ve Şekil 4.15'te sunulmuştur.

Çizelge 4.29. Islak kür edilen harçların aşınma oranları (%)

Islak kür	7. Gün			28. Gün			90. Gün			180. Gün		
	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50
Şahit	9.6	10.0	11.3	8.3	9.8	11.2	8.3	9.6	10.1	8.4	8.8	9.8
%20 YFC	9.5	10.1	17.1	7.9	9.6	12.2	7.6	8.5	11.1	7.3	8.4	10.6
%40 YFC	10.4	11.7	18.3	7.4	11.7	14.6	6.9	11.1	13.5	6.5	11.0	13.2
%60 YFC	10.6	18.8	20.1	9.1	15.0	16.1	8.2	13.2	15.4	8.1	12.1	14.9
%80 YFC	14.3	22.6	45.0	12.8	21.5	30.0	11.4	18.1	28.2	11.2	18.9	26.0



Şekil 4.15. Islak kür edilmiş harçlara ait aşınma oranı-zaman ilişkisi

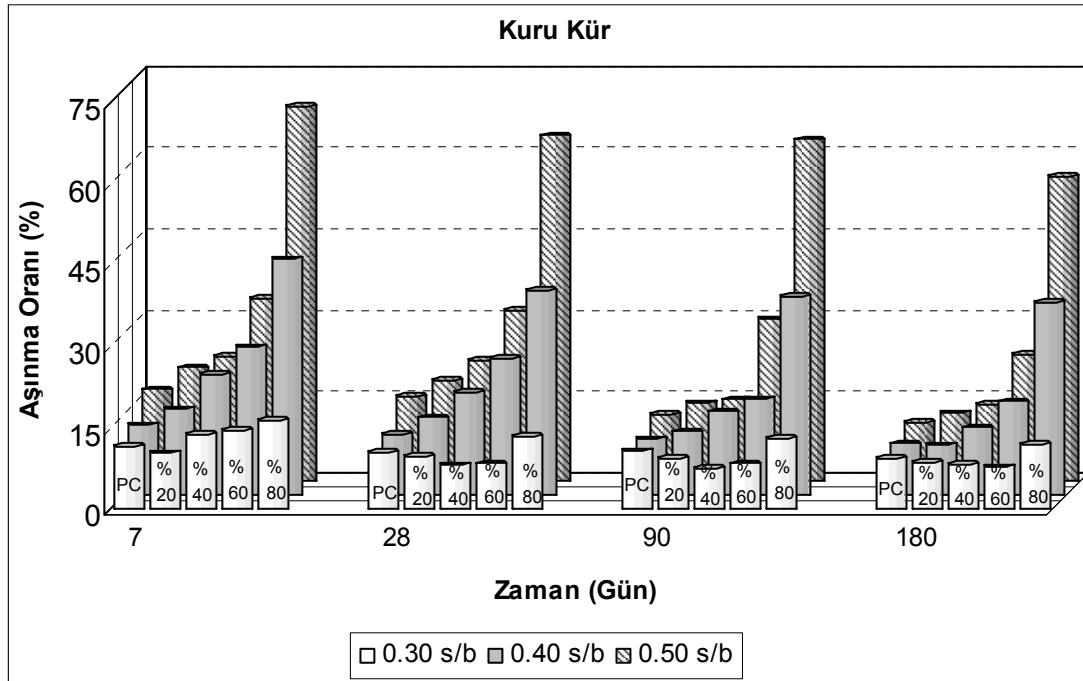
Suda kür edilen harçların % aşınma değerleri incelendiği vakit, cüruf katkılı ve katkısız harç numuneleri için bütün zaman dilimlerinde yükselen su/bağlayıcı oranıyla beraber aşınma oranlarında da bir artış meydana geldiği görülmektedir. 7. günden itibaren 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı oranındaki %20 ve %40 cüruf katkılı harçların şahitlerine göre daha yüksek aşınma direnci gösterdiği, 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip %20 cüruf katkılı harçların da genel olarak tatminkar sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Ancak, 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip cüruf katkılı harç karışımlarının tüm zaman dilimlerindeki aşınma miktarları şahitlerine göre daha fazla olmuştur. Öte yandan bütün su/bağlayıcı oranları için geçen zamanla birlikte aşınma oranlarında da bir azalma meydana gelmiştir.

Farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip kuru kür edilmiş harç numunelerinin zamana bağlı olarak tespit edilen % aşınma oranları Çizelge 4.30 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Çizelge ve şekilden de görüldüğü üzere, kuru ortamda kür edilen harçların % aşınma oranları, ıslak kür edilmiş harçların aşınma değerlerinden daha fazla olmuştur. Ayrıca, bütün su/bağlayıcı oranları için harçların aşınma oranları da geçen zamanla birlikte azalmıştır. Öte yandan, cüruf lu ve cüruf suz harç

numunelerinin aşınma oranlarında da bütün zaman dilimleri için yükselen su/bağlayıcı oranıyla birlikte bir artış meydana gelmiştir. 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı oranındaki %20, %40 ve %60 cüruf katkılı harçların özellikle 28. günden sonra şahitlerine göre daha düşük aşınma oranları gösterdikleri, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip cüruf katkılı harçların da kuru kür şartlarından olumsuz etkilendiği ve bütün zaman dilimleri için şahitlerine kıyasla daha büyük aşınma miktarları sergiledikleri görülmüştür.

Çizelge 4.30. Kuru kür edilen harçların aşınma oranları (%)

Kuru kür	7. Gün			28. Gün			90. Gün			180. Gün		
	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50
Şahit	11.7	13.0	17.0	10.7	11.4	15.7	10.8	10.5	12.3	9.4	9.6	10.9
%20 YFC	10.4	16.0	21.0	9.8	14.4	18.7	9.5	11.9	14.5	8.7	9.3	12.6
%40 YFC	13.8	22.4	23.1	8.2	19.0	22.3	7.6	15.5	15.2	8.3	12.6	14.2
%60 YFC	14.6	27.4	33.7	8.5	25.4	31.5	8.5	17.8	30.0	7.9	17.4	23.4
%80 YFC	16.4	43.6	69.1	13.5	37.8	63.9	13.1	36.8	63.1	12.1	35.6	56.4



Şekil 4.16. Kuru kür edilmiş harçlara ait aşınma oranı-zaman ilişkisi

Düşük su/bağlayıcı oranları için, yüksek fırın cürufu ilavesi ile aşınmaya karşı dirençte bir artış olduğu ve cürufun aşınma direncine olumlu etkisinin genel olarak 28. günden sonra kendini gösterdiği gözlenmiştir. Aşınma mukavemetinde meydana gelen bu artış, cürufun etkili bir puzolan olmasının yanında çimento hamurunda kompasite ve dayanım arttırıcı bir rol oynamasından kaynaklanmaktadır. Etkili bir kür uygulamak şartıyla, yüksek fırın cüruflarının düşük su/bağlayıcı oranları için %40 ikame oranına kadar çimentoyla birlikte kullanılmasının, karayolları, havaalanı, köprü tabliye ve ayakları, akarsu yapıları, parke ve kaldırım taşları, döşeme ve karo gibi aşınmaya maruz elemanların üretilmesinde faydalar sağlayabileceği anlaşılmaktadır.

4.2.4.1. Kür Şartlarının Aşınma Mukavemeti Üzerindeki Etkisi

Kür şartlarının aşınma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak üzere kuru ortamda kür edilen numunelerin aşınma oranları ıslak ortamda kür edilen numunelerin aşınma oranlarının bir yüzdesi olarak hesaplanarak Çizelge 4.31’de verilmiştir.

Çizelge 4.31. Kür şartlarının aşınmaya etkisi (%)

	7. Gün			28. Gün			90. Gün			180. Gün		
	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50
Şahit	121.9	130.0	150.4	128.9	116.3	140.2	130.1	109.4	121.8	111.9	109.1	111.2
%20 YFC	109.5	158.4	122.8	124.1	150.0	153.3	125.0	140.0	130.6	119.2	110.7	118.9
%40 YFC	132.7	191.5	126.2	110.8	162.4	152.7	110.1	139.6	112.6	127.7	114.5	107.6
%60 YFC	137.7	145.7	167.7	93.4	169.3	195.7	103.7	134.8	194.8	97.5	143.8	157.0
%80 YFC	114.7	192.9	153.6	105.5	175.8	213.0	114.9	203.3	223.8	108.0	188.4	216.9

Çizelgeden de görüldüğü üzere, kuru kür edilen harçların aşınma oranları, ıslak kür edilen harçlarınkilere göre daha fazla olmuş ve bu harçlar, hidrasyonları için ihtiyaç duydukları suyu bünyelerinden yitirmeleri nedeniyle tam hidrate olamayıp kuru kür şartlarından daha çok etkilenmiştir. Öte yandan, cüruf içeren ve

içermeyen harçların kür şartlarından etkilenme miktarları, artan su/bağlayıcı oranları ile birlikte daha belirgin bir biçimde kendini göstermeye başlamıştır.

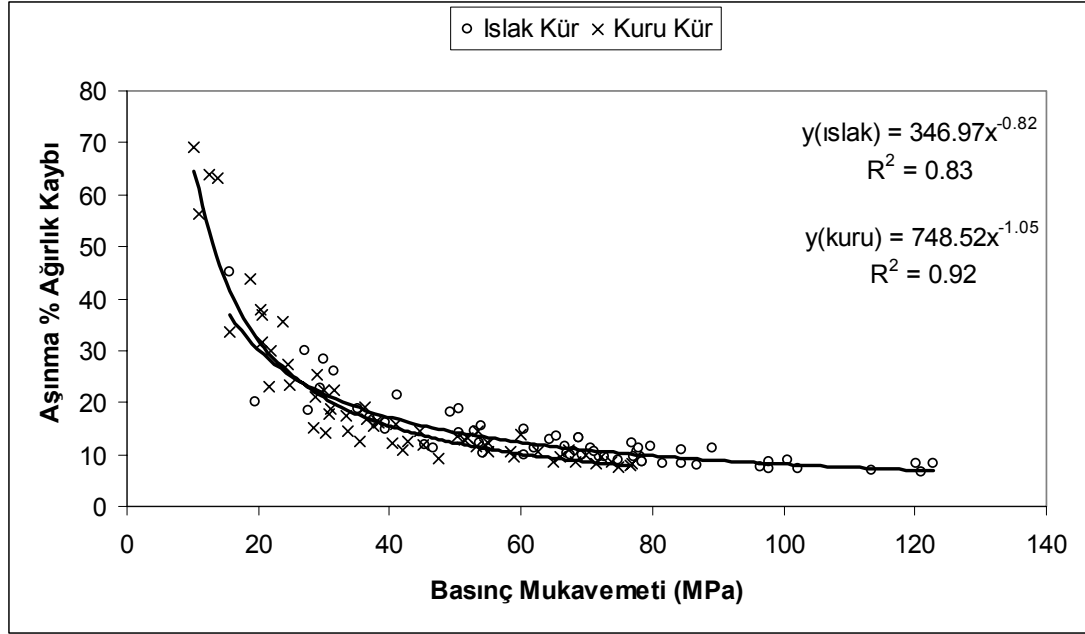
Çizelge sabit bir su/bağlayıcı oranı için incelendiğinde ise artan cüruf miktarı, özellikle 7. gün gibi erken yaştaki aşınma dirençlerinde düşüşler meydana getirmekte ve cüruf katkılı harçlar yetersiz kür şartlarından Portland çimentolu harçlara göre daha fazla etkilenmektedirler. Fakat 28. günden sonra, özellikle 0.30 su/bağlayıcı oranındaki harçlarda artan cüruf ikame oranı, devam eden puzolanik reaksiyonların neticesinde aşınma mukavemetine olumlu katkı sağlamaktadır.

4.2.4.2. Aşınma Mukavemeti ile Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişki

Yapılan araştırma ve uygulamaların sonuçlarına göre, betonun basınç dayanımı, aşınma dayanıklılığını etkileyen en önemli faktör durumundadır (Erdoğan, 2003; Shah ve Ahmad, 1994). Beton dayanımının yüksek olması, betonun içerisindeki kapiler boşlukların daha az miktarda yer almasından kaynaklanmakta, sonuç itibarıyla dayanımı yüksek olan betonların aşınma dayanıklılığı da yüksek olmaktadır.

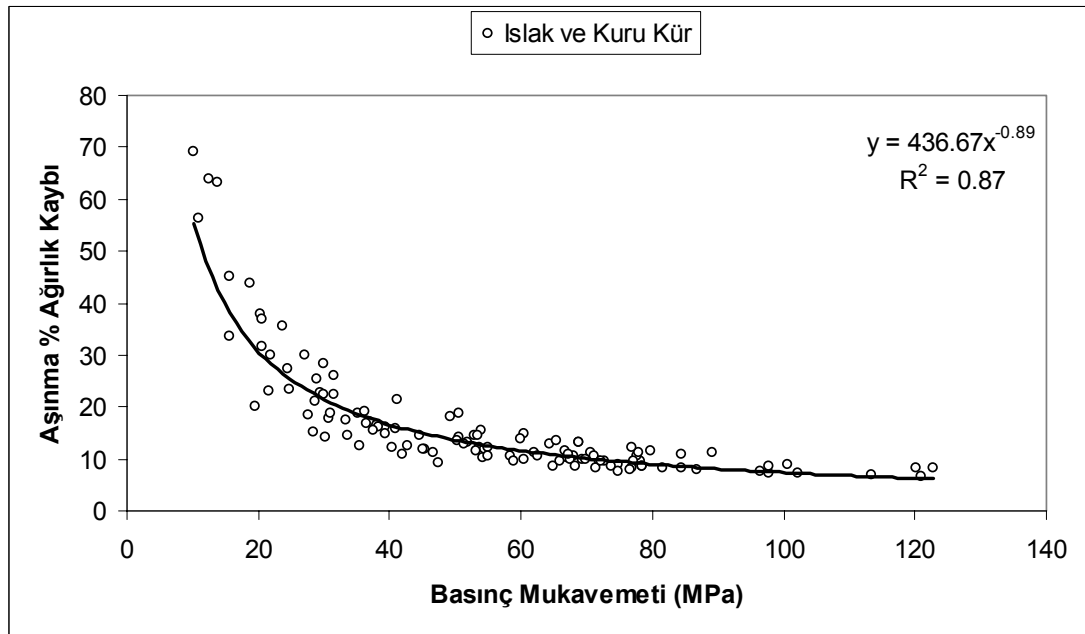
Araştırma kapsamındaki harçların aşınma mukavemetleri daha önce de belirtildiği gibi, Los Angeles deney aleti ile bulunmuştur. Oymael ve Yeğinobalı (1996), Los Angeles aleti ile bulunan beton numune aşınma mukavemetlerinin sürtünme yolu ile buldukları aşınma mukavemetleri ile uyumlu sonuçlar verdiğini ve Los Angeles aşınma aletinin aşınma mukavemetlerinin belirlenmesinde de kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

Aşınma oranı-basınç mukavemeti ilişkisi, ıslak ve kuru kür durumları için ayrı ayrı olarak Şekil 4.17a'da verilmiştir. Aşınma oranı ile basınç mukavemeti arasında ortaya çıkan ilişki doğrusal olmayıp, bu ilişkiden elde edilen korelasyon katsayıları ıslak ve kuru için sırasıyla 0.83 ve 0.92 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.17a. İki ayrı kür durumu için aşınma % ağırlık kaybı-basınç dayanımı ilişkisi

Harç numunelerin aşınma % ağırlık kaybı ile basınç mukavemetlerinin her iki kür durumu için bir arada verildiği Şekil 4.17b’de ise eğrisel bir ilişki ortaya çıkmış ve bu ilişkinin korelasyon katsayısı 0.87 olmuştur.

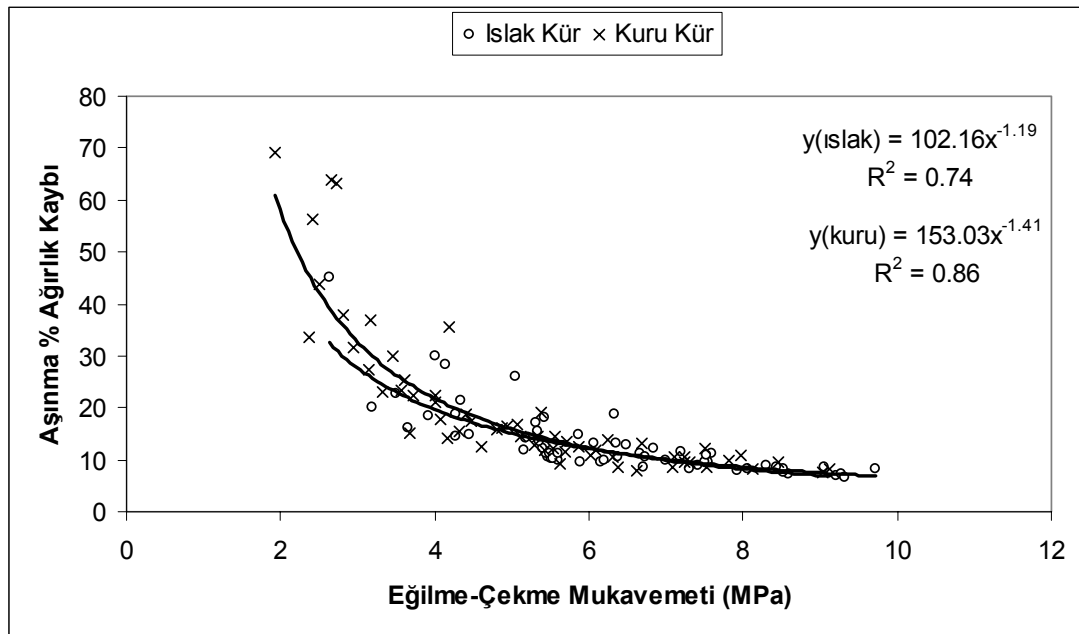


Şekil 4.17b. Her iki kür durumu için aşınma % ağırlık kaybı-basınç dayanımı ilişkisi

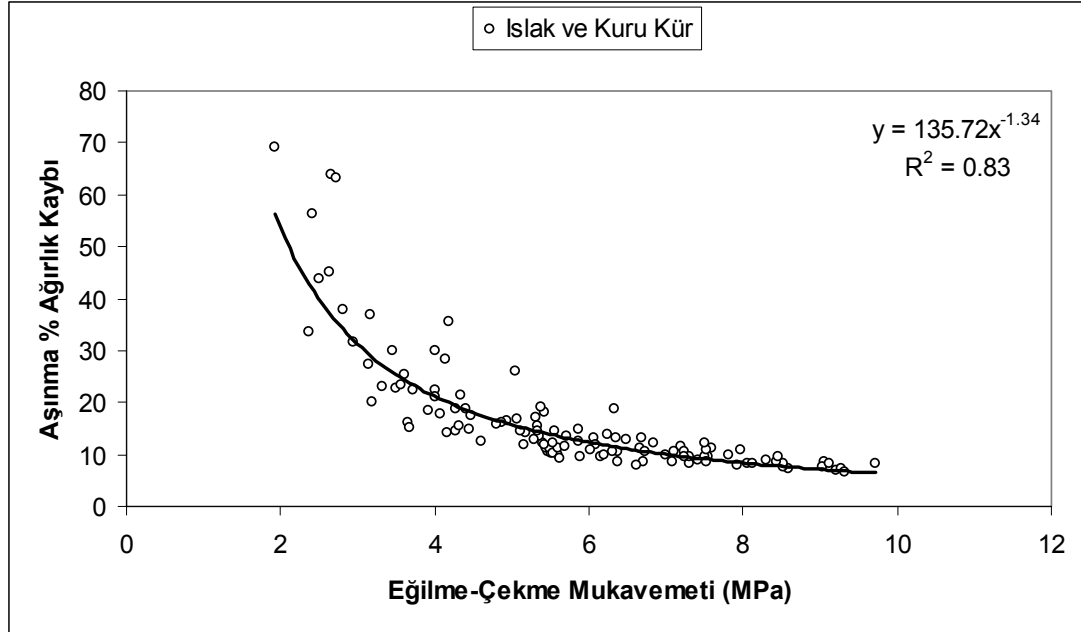
4.2.4.3. Aşınma Mukavemeti ile Eğilme Mukavemeti Arasındaki İlişki

Literatürde harç numunelerin aşınma mukavemeti ile eğilme çekme dayanımları arasında ilişkiyi gösteren çalışmalara fazla rastlanılmamışsa da, uçucu kül katkılı harç numunelerin aşınma mukavemeti ile eğilme çekme dayanımları arasındaki ilişki üzerine bir çalışma yapan Atiş ve Çelik (2002), aşınma mukavemeti ile eğilme çekme mukavemeti arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu bildirmişlerdir.

Harç numunelerin aşınma mukavemeti ile eğilme çekme dayanımları arasındaki ilişki, ıslak ve kuru kür durumları için ayrı ayrı olarak Şekil 4.18a'da verilmiştir. Şekil 4.18a'da, aşınma mukavemeti ile eğilmede çekme mukavemeti arasındaki mevcut veriler doğrultusunda ortaya çıkan eğrisel ilişkilerin korelasyon katsayıları, ıslak ve kuru kür için sırasıyla 0.74 ve 0.86'dır. Harç numunelerin aşınma % ağırlık kayıpları ile eğilme çekme mukavemetleri arasındaki ilişki Şekil 4.18b'de her iki kür durumu için bir arada verilmiş olup, ortaya çıkan eğrisel ilişkinin korelasyon katsayısı 0.83 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.18a. İki ayrı kür durumu için aşınma % ağırlık kaybı-eğilme çekme mukavemeti ilişkisi



Şekil 4.18b. Her iki kür durumu için aşınma % ağırlık kaybı-eğilme çekme mukavemeti ilişkisi

4.2.5. Harç Numunelerin Karbonatlaşma Değerleri

Sertleşmiş çimento hamuru içerisinde yer alan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, KOH ve NaOH gibi alkali oksitler, gözeneklerdeki eriyiğin pH değerini yükseltmek suretiyle alkali bir ortam oluşturarak çelik donatıyı korozyona karşı korurlar. Korozyon, pas payı bölgesinde bulunan koruyucu beton tabakasındaki yüksek alkali değerli (pH=12-13) bazik ortamın bozulması sonucu meydana gelmekte ve donatı kesitinde incelmelere yol açarak yapı elemanının güvenliğini tehlikeye düşürmektedir.

Beton içerisindeki alkalitenin azalması, atmosferde bulunan karbondioksitin kapiler boşluklara girerek betonun bünyesinde bulunan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile birleşmesi sonucu meydana gelmektedir.

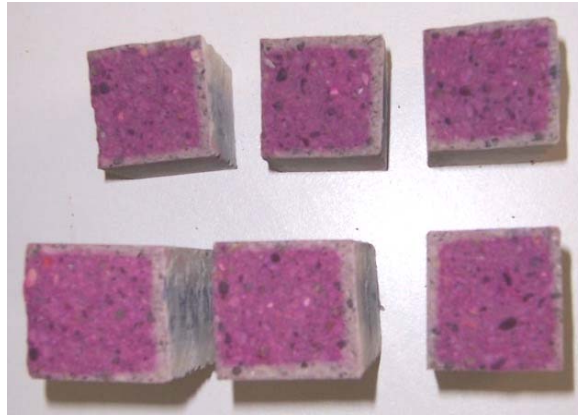


Karbonatlaşma adı verilen bu reaksiyon sonucunda, başlangıçta 12-13 olan alkali ortamın pH derecesi, 9.5'in altına inmekte ve paslanma olayı başlamaktadır.

Karbonatlaşmanın gerçekleşme hızı; zamana, betonun geçirimliliğine, havadaki CO₂ ve nem miktarına bağlıdır. Bununla birlikte, zamanla belirli bir kalınlığa ulaşan CaCO₃ tabakasının oluşmasının ardından CO₂'in beton içerisine girmesi zorlaşacağından, karbonatlaşma hızı yavaşlayarak devam etmektedir.

Karbonatlaşma, beton yüzeyinden başlayarak içeriye doğru ilerlediğinden, 2.5-3.0 cm kadar iç kısımda bulunan yüzeye yakın bölgeler de karbonatlaşmanın etkisi altındadır.

Harç prizmalarında karbonatlaşma derinliği, eğilme mukavemeti deneyi sonucunda ortaya çıkan yarım parçaların kırılma yüzeylerine %0.1'lik phenolphtalein alkol eriyiğinin püskürtülmesiyle ölçülmüştür. Serbest Ca(OH)₂ pembe renk gösterirken, karbonatlaşmış kısımlar renk değişimine uğramamaktadır. Bu durum Şekil 4.19'da görülmektedir.



Şekil 4.19. Karbonatlaşma yapmış harç numuneleri

Ortamda bulunan karbondioksit miktarının yüksek olmasıyla doğal olarak bir artış gösteren karbonatlaşma, havadaki karbondioksit miktarının çok az olduğu durumlarda dahi yer alabilmekte, ancak böyle bir durumda reaksiyonun oluşması çok yavaş seyretmektedir. Öte yandan, karbonatlaşma en çok %50 bağıl neme sahip ortamda yer almaktadır. Ortamdaki bağıl nemin %25'ten az veya %100 olması durumlarında ise karbonatlaşma yer almamaktadır (Erdoğan, 2003).

Araştırma kapsamındaki harçların karbonatlaşma ölçümleri Çizelge 4.32'de sunulmuş olup, ölçümler, literatürde de belirtildiği gibi, su içerisindeki numunelere

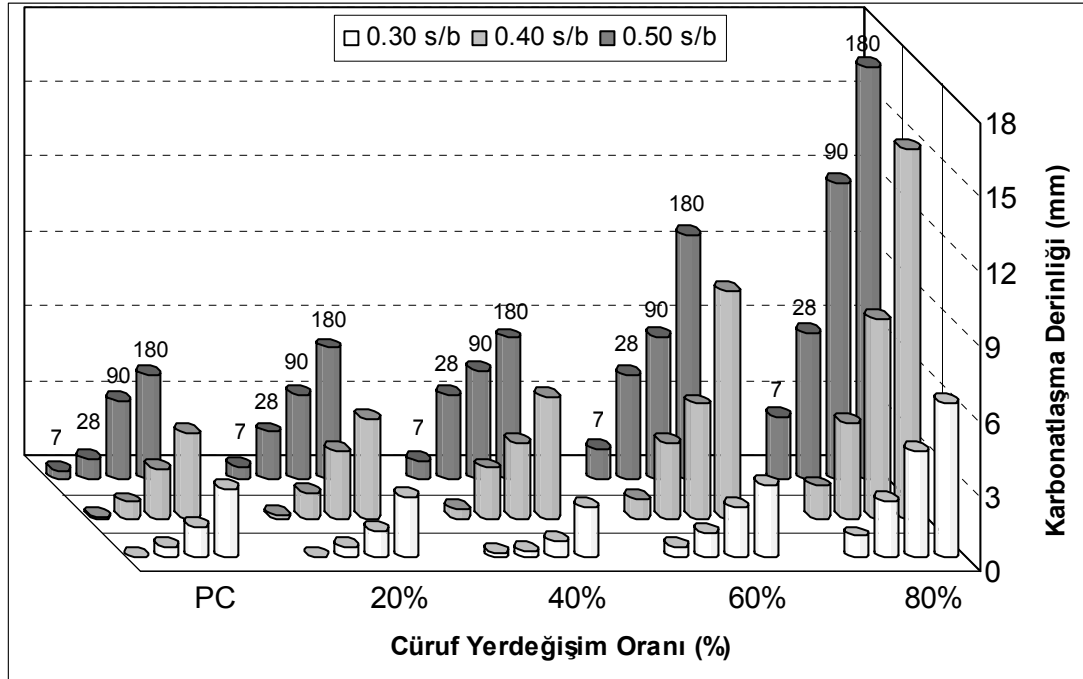
karbondioksit gazının sızmasının zor olması nedeniyle ıslak kür edilmiş numuneler yerine sadece kuru küre maruz bırakılmış numuneler üzerinde yürütülmüştür.

Çizelge 4.32. Kuru kür edilen harçlara ait karbonatlaşma derinlikleri (mm)

Kuru kür	7. Gün			28. Gün			90. Gün			180. Gün		
	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50
Şahit	0	0.08	0.38	0.46	0.68	0.81	1.24	2.00	3.14	2.75	3.42	4.20
%20 YFC	0.06	0.13	0.53	0.40	1.04	1.92	1.08	2.70	3.41	2.45	4.00	5.29
%40 YFC	0.20	0.36	0.74	0.25	2.03	3.40	0.65	3.05	4.38	1.99	4.86	5.69
%60 YFC	0.45	0.77	1.23	1.01	3.06	4.18	2.00	4.59	5.76	2.91	9.09	9.79
%80 YFC	0.86	1.32	2.55	2.26	3.84	5.87	4.25	7.97	11.88	6.20	14.83	16.53

Çizelgeden de görüldüğü gibi, bütün su/bağlayıcı oranları için, harçların karbonatlaşma değerlerinde, numune içerisine nüfuz eden daha fazla CO₂ miktarından dolayı, zamanla birlikte bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca, azalan su/bağlayıcı oranıyla birlikte, daha az boşluğa sahip nispeten daha yoğun bir çimento hamuru meydana geldiğinden, CO₂'nin numune içerisine girmesi zorlaşmış ve karbonatlaşma değerlerinde düşüşler ortaya çıkmıştır. Öte yandan, puzolanik reaksiyonlarının daha yavaş seyretmesinden dolayı, erken yaşlarda artan cüruf katkısı, tüm su/bağlayıcı oranları için karbonatlaşma değerlerini arttırmıştır. Ancak, 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı oranına sahip harçlarda yapılan %20 ve %40 cüruf ikameleri, 28. gün ve daha sonrasındaki karbonatlaşma değerlerinde şahitlerine oranla düşüşler meydana getirmiştir. Bu durumun muhtemel nedeninin, devam eden puzolanik reaksiyonlar neticesinde, cüruf lu harçların bağlayıcı madde hamurlarında meydana gelen daha yoğun yapıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Öte yandan, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarına sahip harçların karbonatlaşma değerleri ise, tüm ikame oranları için şahitlerine göre daha fazla olmuştur.

Araştırma kapsamındaki harçların belirli zaman dilimlerinde elde edilen karbonatlaşma değerleri ayrıca bir grafik halinde Şekil 4.20'de verilmiştir.

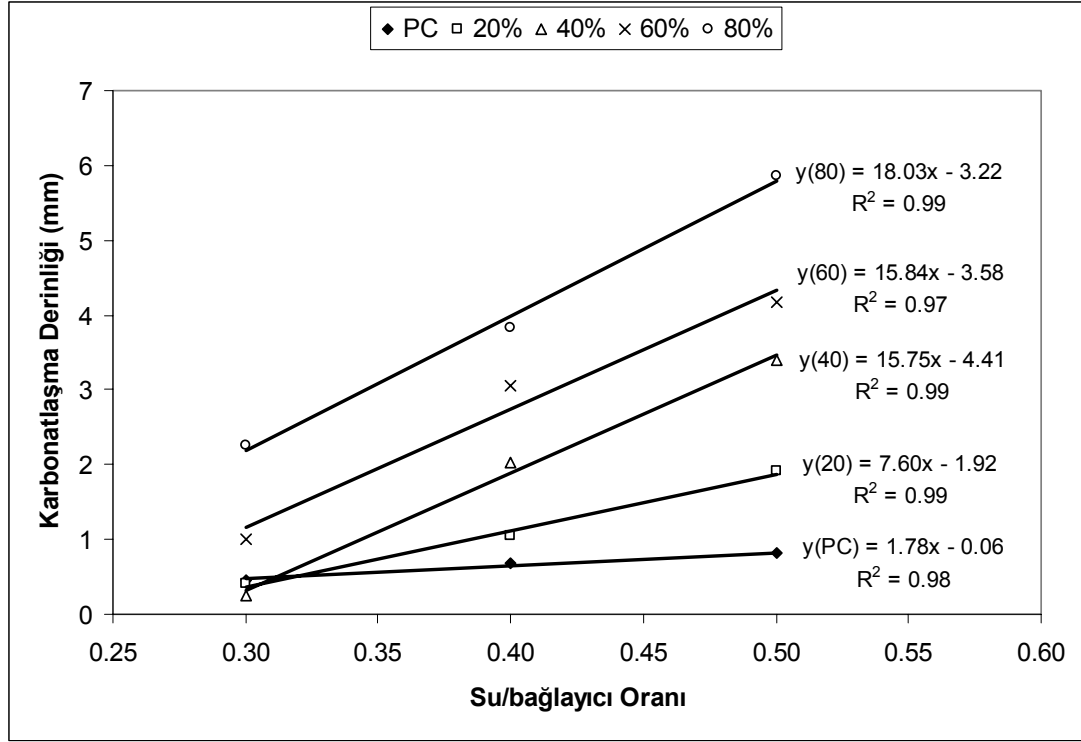


Şekil 4.20. Belirli zaman dilimlerinde harç numuneler için elde edilen karbonatlaşma miktarı-cüruf ikame oranı ilişkisi

Şekilden 4.20'den, yüksek su/bağlayıcı oranı ile üretilen numunelerin düşük su/bağlayıcı oranı ile üretilen numunelere göre daha fazla karbonatlaşma gösterdiği ve artan su/bağlayıcı oranının yüksek ikame yüzdelerine sahip cüruf katkılı karışımların karbonatlaşma miktarlarını, şahit karışımlara oranla daha belirgin bir şekilde artırma yönünde etkilediği görülmektedir.

Harç numunelerinde en çok karbonatlaşma, perdahlama yüzeyinin altındaki iç kısımlarda görülmüştür. Kalıplara yerleştirilen harç numunesi vibrasyona tabi tutulduğu zaman, harç içerisindeki karışım suyu, yer çekiminin etkisiyle aşağı doğru inen kum ve çimento taneleri arasından hareket ederek üst yüzeye çıkma eğilimi göstermektedir. Bu durumda, su/bağlayıcı oranı nispeten daha yüksek hale gelen prizmanın üst yüzeyi, harç numunelerin sertleşip dayanım kazanmasından sonra daha gözenekli bir yapı kazanmakta ve CO₂ girişine daha müsait bir duruma gelmektedir.

Su/bağlayıcı oranının cüruf katkılı ve katkısız harçların 28 günlük karbonatlaşma değerleri üzerindeki etkisi Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Su/bağlayıcı oranının cüruf içeren ve içermeyen harçların 28 günlük karbonatlaşma derinliği üzerine etkisi

Şekilden de görüldüğü üzere, su/bağlayıcı oranının artmasıyla harçların 28 günlük karbonatlaşma derinliklerinde bir artış meydana gelmiştir. Normal Portland çimentosu ile yapılan harçlar, artan su/bağlayıcı oranından cüruf katkılı harçlara göre daha az etkilenmiş olup, cüruf katkılı harçların karbonatlaşma derinliklerinde meydana gelen bu artış oranı, özellikle yükselen cüruf ikame oranıyla daha da belirgin olmaktadır. Bu durum literatürde de belirtilmiş olup, bazı durumlar için cüruf katkılı betonlara ait karbonatlaşma derinlikleri, özellikle 0.45 ve yukarısındaki su/bağlayıcı oranlarında önemli bir şekilde daha da yüksek olabilmektedir (Newman ve Choo, 2003).

4.2.6. Harç Numunelerin Su Emme ve Boşluk Oranları

Bir malzeme içerisindeki boşlukların o malzemenin performansını etkilediği bilinmektedir. Katı cisimlerin yapısı ve oluşumu nedeniyle, yapı malzemelerinin

çoğunun içyapısında gözle görülebilen ya da görülemeyen, irili ufaklı, sürekli veya süreksiz birçok boşluklar bulunmaktadır. Bu boşluklar, bazen yalıtım amaçlı malzemelerde özellikle istenebildiği gibi, boşlukların iri ve sürekli olmaları durumunda, sıvı ya da gazlar malzemenin içerisine sızarak bünyesine zarar verebilmektedir.

Çimentoya ilave edilen cüruf, bağlayıcı madde hamurunun yapısını iyileştirmekte ve kompasitesi daha yüksek bir içyapı meydana getirmektedir. Artan cüruf içeriğiyle, gözenek hacminde fazla bir değişim olmamasına rağmen, toplam boşluk dağılımı gittikçe daha ince olmakta ve gözenek çaplarının küçülmesinden dolayı su emme ve boşluk oranları daha düşük değerler almaktadır.

Araştırma kapsamında yer alan harçların 7, 28, 90 ve 180 günlük deney sürelerine ait su emme oranı değerleri ıslak ve kuru kür için sırasıyla Çizelge 4.33 ve Çizelge 4.34'te verilmiştir.

Çizelge 4.33. Islak kür edilen harçların ağırlıkça su emme oranları (%)

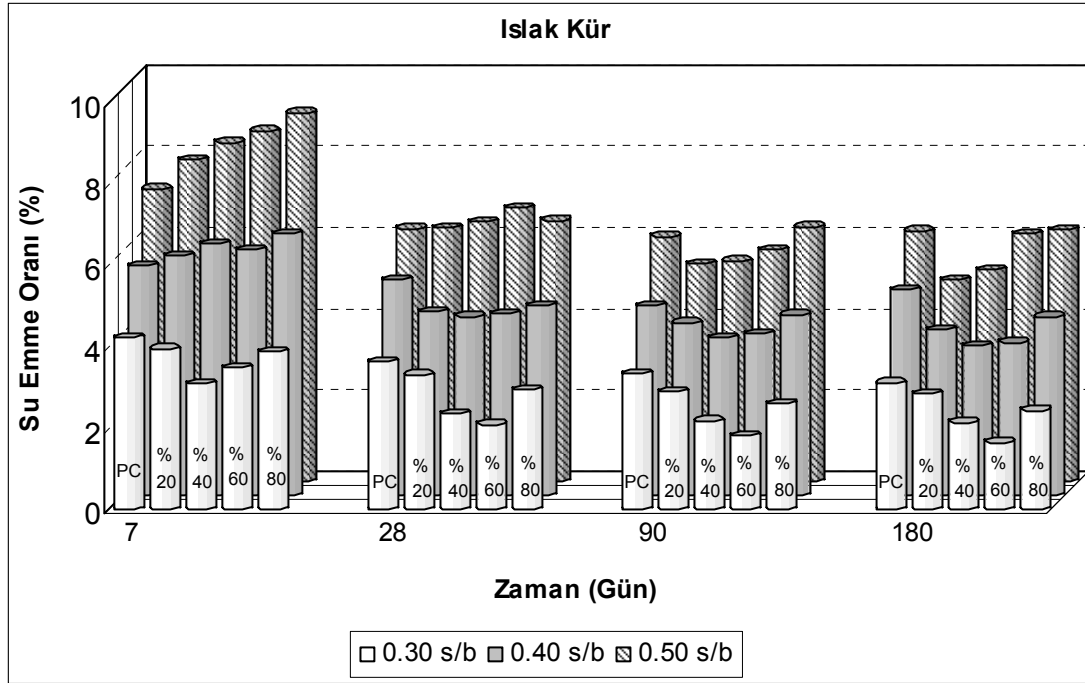
Islak kür	7. Gün			28. Gün			90. Gün			180. Gün		
	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50
Şahit	4.23	5.65	7.18	3.64	5.30	6.21	3.33	4.66	6.01	3.10	5.05	6.15
%20 YFC	3.94	5.88	7.90	3.30	4.51	6.24	2.90	4.23	5.34	2.85	4.08	4.95
%40 YFC	3.09	6.17	8.32	2.35	4.39	6.37	2.17	3.86	5.41	2.13	3.66	5.21
%60 YFC	3.47	6.03	8.61	2.08	4.45	6.71	1.79	3.97	5.70	1.64	3.75	6.08
%80 YFC	3.87	6.42	9.05	2.94	4.65	6.40	2.60	4.43	6.25	2.42	4.38	6.18

Çizelge 4.34. Kuru kür edilen harçların ağırlıkça su emme oranları (%)

Kuru kür	7. Gün			28. Gün			90. Gün			180. Gün		
	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50
Şahit	6.56	7.37	9.36	6.36	7.15	8.85	6.29	6.91	8.58	6.08	7.20	8.47
%20 YFC	6.24	8.26	9.78	5.97	7.99	9.46	5.86	7.71	9.23	5.72	7.67	9.11
%40 YFC	5.94	8.94	10.41	5.70	8.31	10.05	5.78	8.25	9.77	5.70	8.18	9.62
%60 YFC	5.87	9.14	11.19	5.90	9.00	10.99	5.78	8.88	10.14	5.74	8.64	10.15
%80 YFC	5.09	9.83	11.64	5.25	9.40	11.07	5.19	9.11	10.93	5.24	8.96	10.78

İki farklı ortamda kür edilmiş harçların % su emme oranlarının verildiği Çizelge 4.33 ve Çizelge 4.34 incelendiğinde, geçen zamanla beraber tüm harçların su emme değerlerinde bir azalmanın meydana geldiği ve kuru kür edilen numunelerin ıslak kür edilen numunelere göre daha fazla su emme oranlarına sahip olduğu görülmektedir. Öte yandan her iki kür durumu için, artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte bağlayıcı madde hamurunda yer alan kapiler boşlukların miktarındaki artışa bağlı olarak tüm harç karışımlarının su emme değerlerinde bir yükselme meydana gelmiştir.

Farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip ıslak kür edilmiş harç numunelerinin su emme oranı-zaman ilişkisi Şekil 4.22’de verilmiştir.

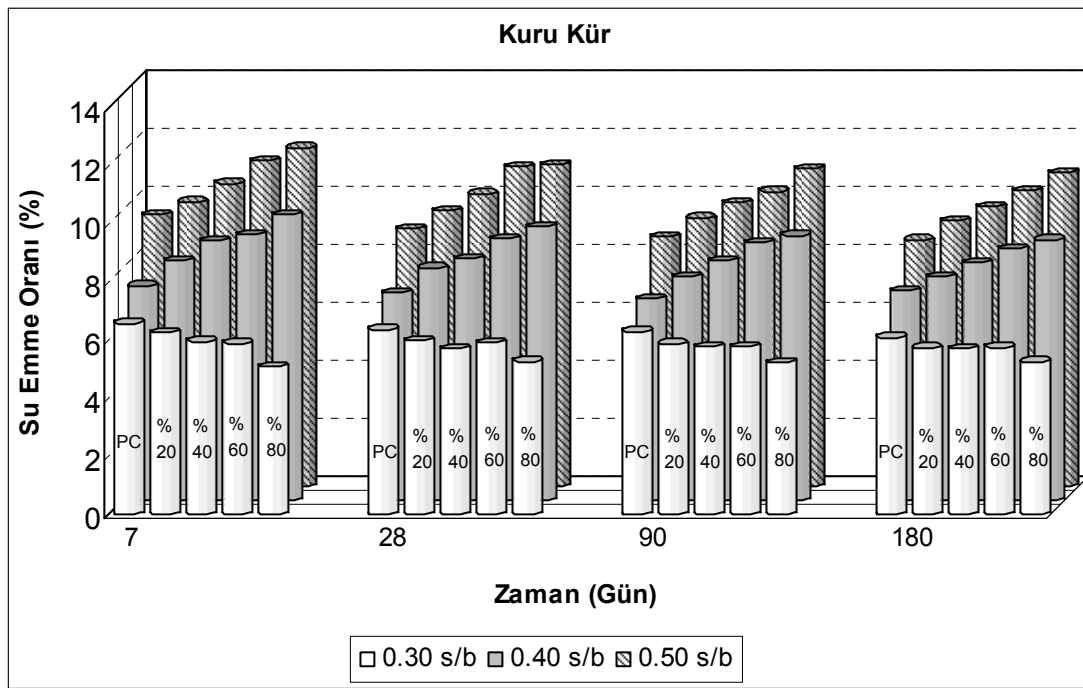


Şekil 4.22. Islak kür edilmiş harçlara ait su emme oranı-zaman ilişkisi

Şekil 4.22’de de görüldüğü üzere, 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip ıslak kür edilmiş tüm cürufli karışımlar, bütün zaman dilimleri için şahitlerine göre daha düşük su emme oranları sergilemiştir. Öte yandan su/bağlayıcı oranı 0.40 olan ıslak kür edilmiş cüruf katkılı harçlar, 7. gün gibi erken bir yaşta yüksek su emme oranları gösterse de daha sonraki dönemlere bakıldığında, şahitlerine göre daha az su emme oranları ortaya koymuşlardır. Ancak, 0.50 gibi yüksek su/bağlayıcı oranına sahip

cüruf katkılı harçlar ise düşük su/bağlayıcı oranındakilere göre daha sonraki yaşlarda kendini göstermekte ve genel olarak 90. günden sonra şahidinden düşük ya da ona eşdeğer su emme oranları sergilemektedir.

Farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip kuru kür edilmiş harç numunelerinin su emme oranı-zaman ilişkisi Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23. Kuru kür edilmiş harçlara ait su emme oranı-zaman ilişkisi

Şekil 4.23'ten, 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip kuru kür edilmiş tüm cürufllu karışımların, bütün zaman dilimleri için şahitlerine göre daha düşük su emme oranları sergilediği görülmektedir. Ancak, kuru küre maruz cürufllu karışımlar artan su/bağlayıcı oranından daha çok etkilendiklerinden 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranındaki cürufllu karışımlar, ıslak kürdekilerin aksine tüm yaşlar için şahitlerinden daha yüksek su emme oranları göstermişlerdir.

Beton elemanlarda karşılaşılan bozulma olayı ve miktarı, bağlayıcı hamurunun mikro yapısı ile yakından ilişkilidir. Atmosferde ve sudaki zararlı kimyasalların varlığı gibi çevresel etkenler, bağlayıcı hamurun yapısındaki bozulmanın asıl sebeplerindendir. Bu tür zararlı kimyasalların beton içerisine

girmesinde ise betondaki boşluk miktarı önemli rol oynamaktadır. Boşluk oranı yüksek olan sertleşmiş çimento hamurunun dayanımı daha az, su geçirgenliği ise daha çok olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Araştırma kapsamında yer alan harçların 7, 28, 90 ve 180 günlük deney sürelerine ait boşluk oranı değerleri ıslak ve kuru kür için sırasıyla Çizelge 4.35 ve Çizelge 4.36’da verilmiştir.

Çizelge 4.35. Islak kür edilen harçların boşluk oranları (%)

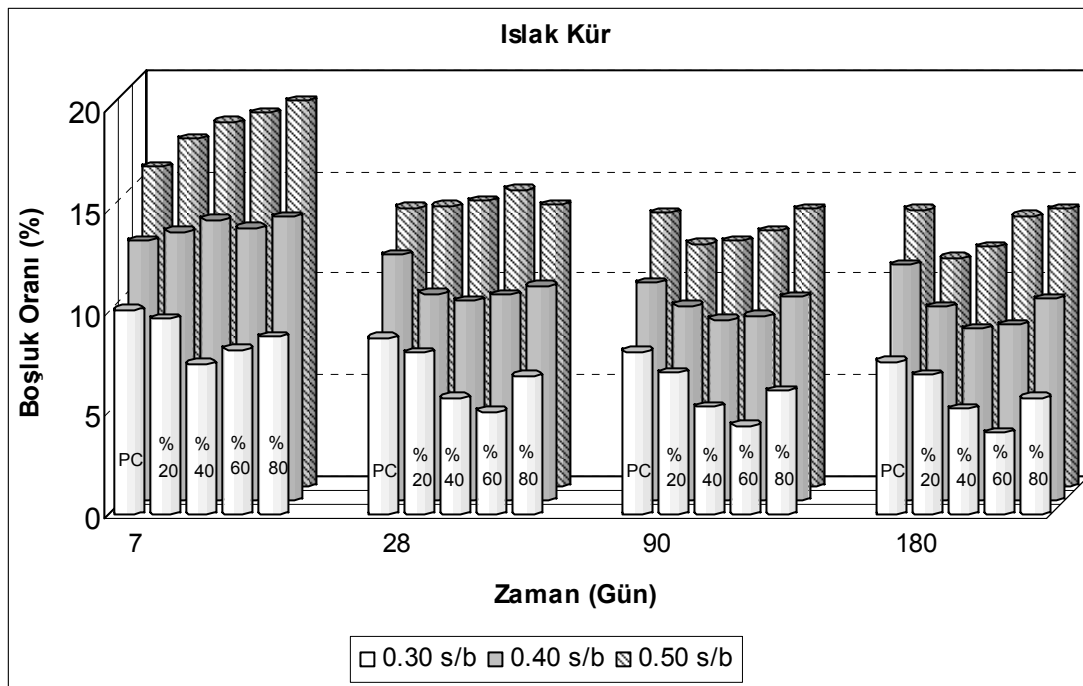
Islak kür	7. Gün			28. Gün			90. Gün			180. Gün		
	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50
Şahit	10.05	12.78	15.71	8.67	12.07	13.70	8.00	10.70	13.41	7.50	11.56	13.59
%20 YFC	9.64	13.21	17.09	7.95	10.16	13.78	6.97	9.57	11.93	6.84	9.52	11.22
%40 YFC	7.39	13.79	17.91	5.71	9.83	14.00	5.29	8.87	12.08	5.21	8.41	11.74
%60 YFC	8.10	13.39	18.33	5.04	10.12	14.58	4.36	9.06	12.53	4.00	8.65	13.29
%80 YFC	8.75	13.91	18.92	6.79	10.54	13.84	6.10	10.00	13.65	5.71	9.89	13.61

Çizelge 4.36. Kuru kür edilen harçların boşluk oranları (%)

Kuru kür	7. Gün			28. Gün			90. Gün			180. Gün		
	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50
Şahit	15.05	16.49	20.23	14.80	16.08	19.29	14.48	15.63	18.84	14.30	16.29	18.72
%20 YFC	14.52	18.30	20.98	14.14	17.44	20.45	13.89	17.18	20.04	13.67	17.13	19.88
%40 YFC	14.04	19.46	22.02	13.62	18.27	21.43	13.79	18.24	20.99	13.59	18.13	20.72
%60 YFC	13.78	19.80	23.37	13.90	19.49	23.08	13.63	19.31	21.62	13.52	19.00	21.67
%80 YFC	11.64	21.09	24.13	11.98	20.32	23.16	11.89	19.86	22.99	11.93	19.63	22.77

İki farklı ortamda kür edilmiş harçların % boşluk oranlarının verildiği Çizelge 4.35 ve Çizelge 4.36 incelendiğinde, su emme değerlerinde olduğu gibi, geçen zamanla beraber tüm harçların boşluk oranlarında bir azalmanın meydana geldiği ve ıslak kür edilen numunelerin kuru kür edilen numunelere göre daha az boşluk oranına sahip olduğu görülmektedir. Öte yandan, artan su/bağlayıcı oranı, ıslak ve kuru kür edilmiş tüm harç karışımlarının boşluk oranı değerlerinde, bağlayıcı madde hamurunda yer alan kapiler boşlukların miktarındaki artışa bağlı olarak bir yükselmeye neden olmuştur.

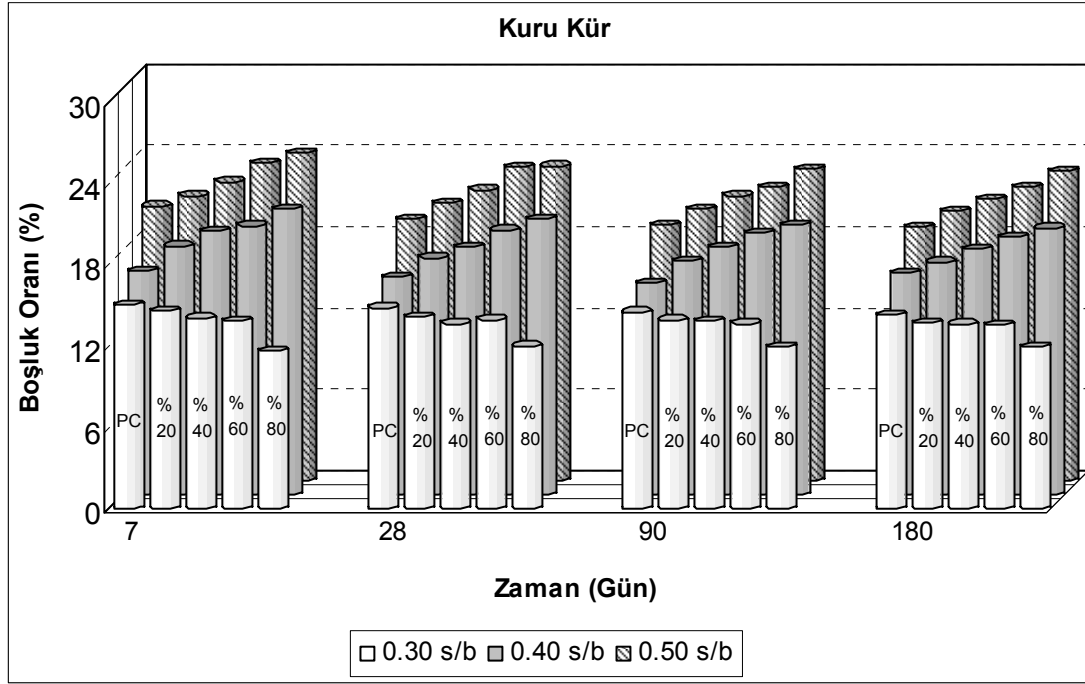
Islak kür edilmiş harç numunelerinin değişik su/bağlayıcı oranları için boşluk oranı-zaman ilişkisi Şekil 4.24'te verilmiştir. Şekil 4.24'te görüldüğü üzere, ıslak kür edilmiş 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip tüm cüruflu karışımların boşluk oranları, bütün zaman dilimleri için şahitlerine göre daha düşüktür. Öte yandan su/bağlayıcı oranı 0.40 olan ıslak kür edilmiş cüruf katkılı harçlar, 7. gün gibi erken bir yaşta yüksek boşluk oranları göstermelerine rağmen sonraki günlerde, şahitlerine göre daha az boşluk oranları sergilemişlerdir. Ancak, diğer su/bağlayıcı oranındakilere kıyasla 0.50 gibi yüksek su/bağlayıcı oranına sahip cüruflu harçlar, artan su/bağlayıcı oranından olumsuz etkilendiğinden genel olarak 90 günden sonra kendini göstermekte ve şahidinden düşük ya da ona eşdeğer boşluk oranları sergilemektedir.



Şekil 4.24. Islak kür edilmiş harçlara ait boşluk oranı-zaman ilişkisi

Kuru kür edilmiş harç numunelerinin değişik su/bağlayıcı oranları için boşluk oranı-zaman ilişkisi Şekil 4.25'te verilmiştir. Şekil 4.25'ten de görüldüğü üzere, 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip kuru kür edilmiş tüm cüruflu karışımlar, bütün zaman dilimleri için şahitlerine göre daha düşük boşluk oranları sergilemiştir. Ancak, kuru küre maruz cüruflu karışımlar artan su/bağlayıcı oranından olumsuz olarak etkilendiklerinden 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranındaki cüruflu karışımlar, ıslak

kürdekilerin aksine tüm yaşlar için şahitlerinden daha yüksek boşluk oranları göstermişlerdir.

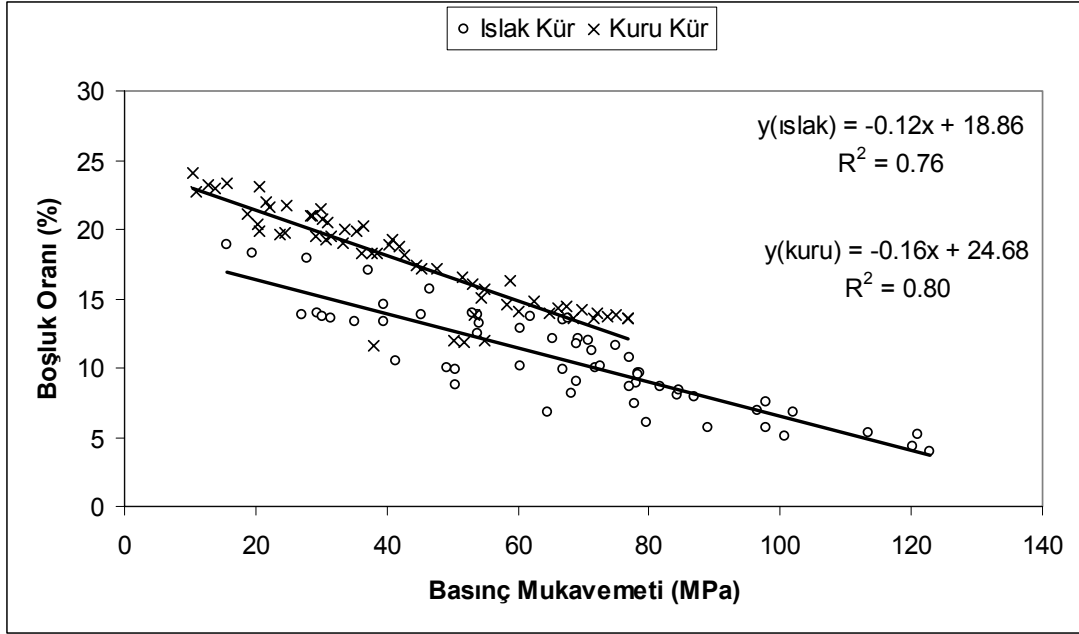


Şekil 4.25. Kuru kür edilmiş harçlara ait boşluk oranı-zaman ilişkisi

Elde edilen sonuçlar, 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı oranına sahip cüruf katkılı harçların, bütün yer değişim oranları için her iki kür durumunda da şahitlerine göre daha düşük su emme ve boşluk oranları sergilediğini ve kür şartlarının düşük su/bağlayıcı oranına sahip cüruf katkılı harçları daha az etkilediğini göstermektedir.

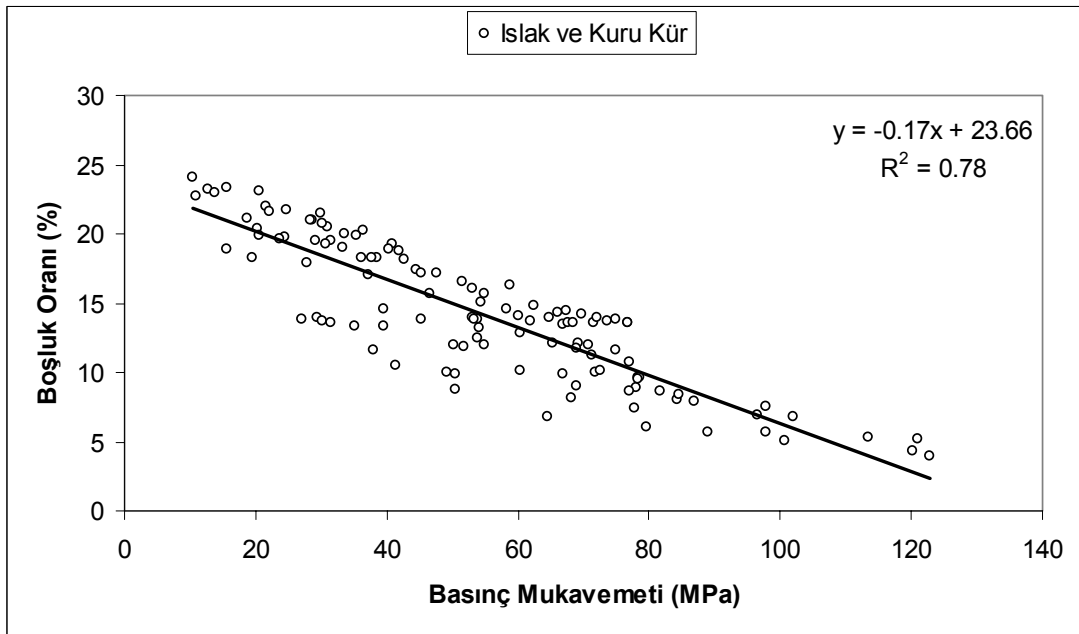
4.2.6.1. Boşluk Oranı ile Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişki

Beton içerisinde boşlukların bulunması dayanımı oldukça düşürmektedir. Boşluk oranı ne kadar fazla ise dayanımın da o derece düşeceği kanısı vardır. Bu nedenle, bu çalışmada elde edilen boşluk oranı değerleri ve basınç dayanımı arasında bir ilişki aranmıştır. Boşluk oranı-basınç dayanımı ilişkisinin her iki kür durumu için ayrı olarak verildiği Şekil 4.26a'da doğrusal bir ilişki ortaya çıkmış, elde edilen korelasyon katsayıları ıslak ve kuru için sırasıyla 0.76 ve 0.80 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.26a. İki ayrı kür durumu için boşluk oranı-basınç mukavemeti ilişkisi

Basınç dayanımlarına karşılık gelen boşluk oranlarının her iki kür durumu için bir arada verildiği Şekil 4.26b’de ise doğrusal bir ilişki ortaya çıkmış ve bu ilişkinin korelasyon katsayısı 0.78 olmuştur.



Şekil 4.26b. Her iki kür durumu için boşluk oranı-basınç mukavemeti ilişkisi

Çimentonun yüksek fırın cürufu ile kısmi olarak yer değiştirilmesi sonucu elde edilen bağlayıcı hamurunun mikro yapısı oldukça geçirimsiz olmaktadır. Dolayısıyla durabilite ve geçirgenlik gibi problemlerle karşı karşıya olan, liman ve deniz platformları, köprü ayağı ve su iletim kanalları gibi hidrolik yapılar ile havaalanı, beton yollar, temel ve perde duvarları gibi yapı elemanlarının yapımında cüruf katkılı çimento hamurunun kullanılması uygun olacaktır.

4.2.7. Harç Numunelerin Kapiler Su Emme Katsayıları

Mikron mertebesinde kılcal boşluklara sahip olan bir cismin herhangi bir yüzeyi suya değecek olduğu takdirde, su zamanla cisim içerisinde yükselmeye başlar. Bu durum, önlem alınmadığı takdirde, bir takım istenmeyen olaylara yol açabilmektedir. Beton yapılar da bulundukları konum itibarıyla muhtelif şekillerde su ve zararlı kimyasal sıvılarla temas halinde olabilirler. Betonun değişik sıvılar ile temas etmesi binaların zemin katlarında bu olay nedeniyle rutubet görülebilmesine neden olmaktadır. Sıvılar, beton elemanlar içerisinde kılcallık (kapilarite) olarak adlandırılan fiziksel bir hareketle yol almaktadır.

Deneyde, boyutları 40x40x160 mm olan harç numuneler kullanılmıştır. Temas halinde olacak su seviyesinin 5 mm olarak ayarlandığı mesnetler üzerine 40x160 mm'lik yüzeyleri boyunca oturtulan numunelerin yan yüzleri parafinle kaplanmıştır. Deneyde; 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81 ve 100 dakikalık sürelerde numune tarafından absorbe edilen su miktarları tespit edilmiş ve kapilarite katsayısı aşağıdaki formül yardımıyla elde edilmiştir.

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (4.3)$$

Q = Absorbe edilen su miktarı (cm³)

A = Suyla temas halinde olan yüzeyin alanı (cm²)

t = Zaman (sn)

k = kapilarite katsayısı (cm/sn^{1/2})

Kapilarite katsayısı, her bir $\sqrt{t}$ 'ye karşılık gelen Q/A değerleri arasındaki lineer ilişkinin eğiminden hesaplanmaktadır.

Araştırma kapsamındaki harçların 28 günlük kapiler su emme katsayıları Çizelge 4.37'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.37. Harçlara ait 28 günlük kapiler su emme katsayıları ($\text{cm/sn}^{1/2}$)

	Islak kür			Kuru kür		
	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50
Şahit	0.00073	0.00074	0.00097	0.00104	0.00265	0.00572
%20 YFC	0.00043	0.00052	0.00106	0.00092	0.00427	0.00728
%40 YFC	0.00032	0.00070	0.00120	0.00089	0.00634	0.01043
%60 YFC	0.00018	0.00098	0.00135	0.00108	0.00775	0.01181
%80 YFC	0.00027	0.00114	0.00187	0.00273	0.01054	0.01247

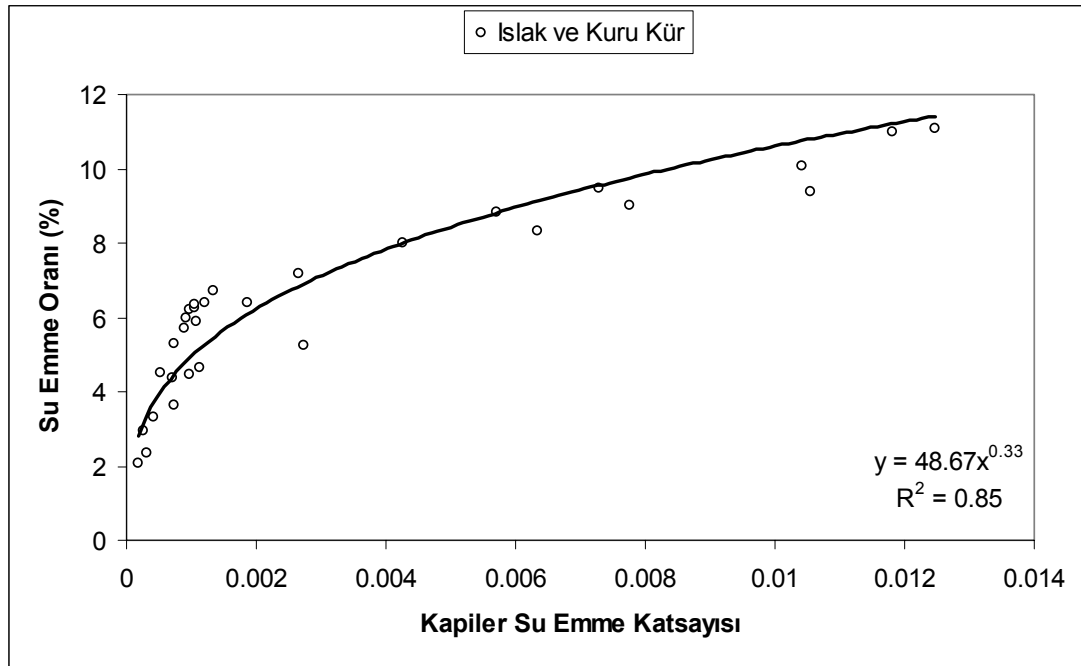
Çizelgeden, her iki kür durumu için, artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte kapiler su emme katsayılarında da bir artış olduğu görülmektedir. Öte yandan, kuru kür edilen harçların kapiler su emme katsayıları, ıslak kürdekilere kıyasla oldukça fazla olmuştur.

0.30 su/bağlayıcı oranındaki kuru kür edilmiş harçlarda, %80 dışındaki diğer cüruf katkılı harçların kapiler su emme katsayıları, şahitlerine eşdeğer ya da daha düşük olmasına karşın, kuru kür edilmiş harç numuneler, genel olarak kür şartlarından daha çok etkilenmişler ve özellikle 0.40 ve 0.50 gibi yüksek su/bağlayıcı oranlarındaki harçlar, ıslak kürdekilere göre daha yüksek kapiler su emme katsayıları sergilemişlerdir. Bu durum literatürde de bildirilmiş olup, Taşdemir (1998), kılcal su emme katsayılarının kür koşullarına karşı oldukça duyarlı olduğunu ve bu etkinin düşük mukavemet değerlerine sahip betonlarda daha fazla olduğunu belirtmiştir.

Islak kürde ise, 0.30 su/bağlayıcı oranındaki cürufllu harçların kapiler su emme katsayıları, bütün yer değişim oranları için şahitlerinden daha düşük olurken, su/bağlayıcı oranı 0.40 olan %20 ve %40 cüruf katkılı harçların da şahitlerine göre tatmin edici kapiler su emme katsayılarına sahip olduğu görülmektedir. Öte yandan, 0.50 gibi yüksek su/bağlayıcı oranlarına sahip harçlarda, çimentonun cüruf ile yer

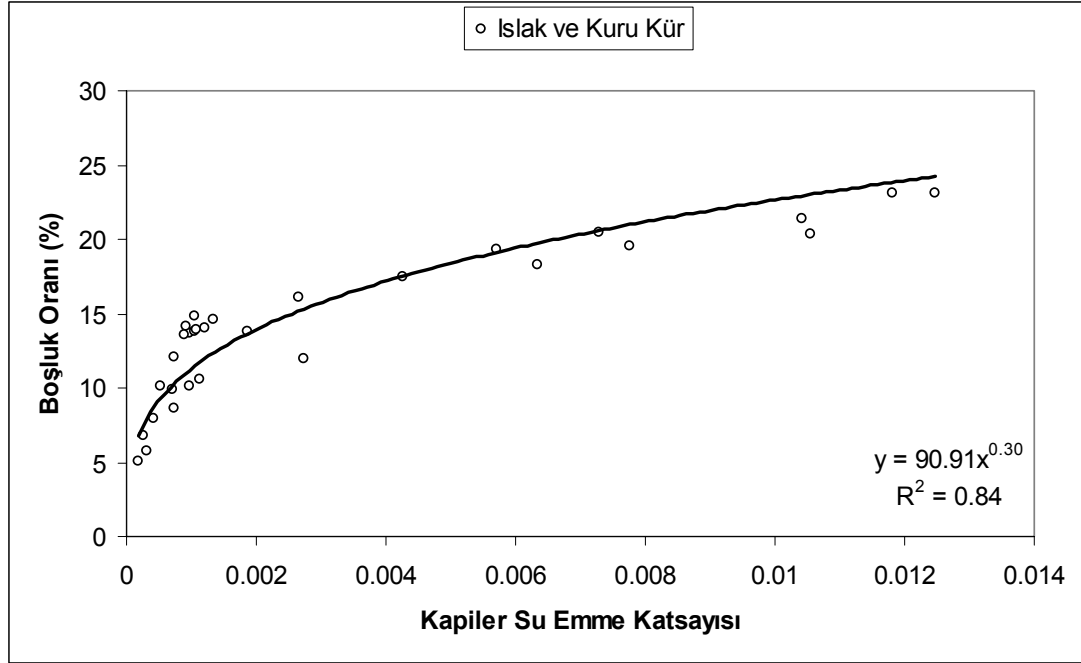
değişime uğratılmasının kılcal su emme katsayılarını şahitlerine göre arttırdığı görülmektedir.

Kapiler su emme katsayısı ile ağırlıkça su emme oranı arasında bir ilişki kurabilmek amacıyla her bir karışıma ait kapiler su emme katsayısına karşılık gelen su emme oranları bir grafik üzerinde gösterilmiştir. Her iki kür durumuna ait kapiler su emme katsayıları ile ağırlıkça su emme değerlerinin gösterildiği Şekil 4.27a'da harçlara ait bu iki özellik arasında su emme oranının artmasıyla kapiler su emme katsayısının arttığını gösteren fakat doğrusal olmayan bir ilişki görülmektedir. Kurulan eğrisel ilişkiye ait korelasyon katsayısı 0.85'tir.



Şekil 4.27a. Su emme oranı-kapiler su emme katsayısı ilişkisi

Kapiler su emme katsayısı ile boşluk oranı arasında bir ilişki kurabilmek amacıyla her bir karışıma ait kapiler su emme katsayısına karşılık gelen boşluk oranları bir grafik üzerinde gösterilmiştir. Her iki kür durumuna ait kapiler su emme katsayıları ile boşluk oranlarının gösterildiği Şekil 4.27b'de harçlara ait bu iki özellik arasında boşluk oranının artmasıyla kapiler su emme katsayısının arttığını gösteren fakat doğrusal olmayan bir ilişki görülmektedir. Kurulan eğrisel ilişkiye ait korelasyon katsayısı 0.84'tür.



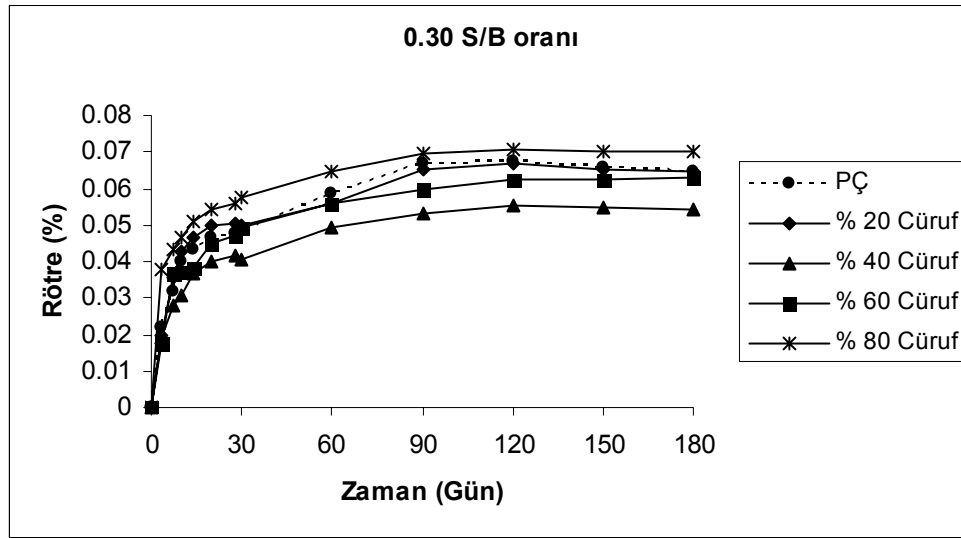
Şekil 4.27b. Boşluk oranı-kapiler su emme katsayısı ilişkisi

4.2.8. Harç Numunelerin Rötire Değerleri

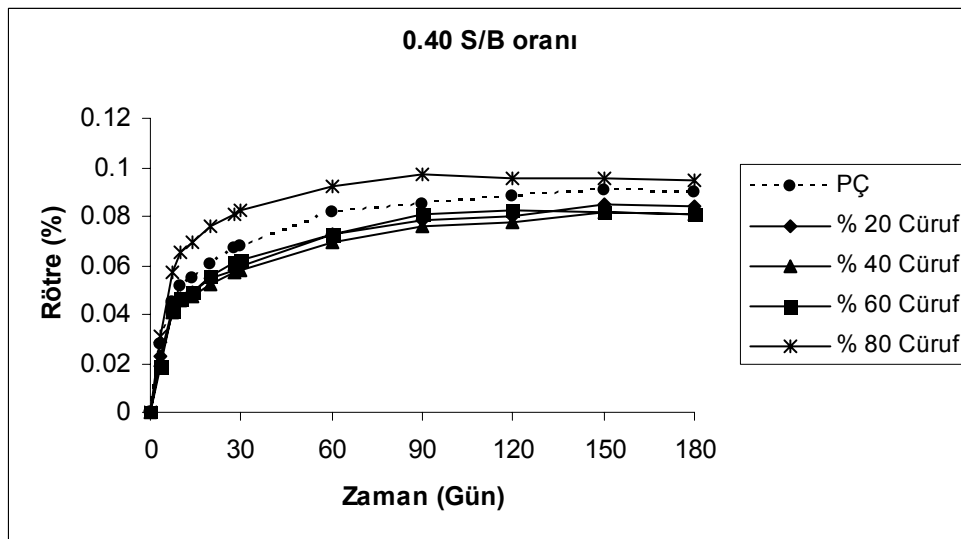
Betonun içerisindeki suyun fiziksel ve kimyasal nedenlerle azalması sonucunda betonun boyunda ve hacminde yer alan küçülmeye rötire denilmektedir. Rötirenin temel nedeni betondaki suyun azalmasıdır. Rötire kendi içerisinde bir kaç değişik sınıfa ayrılmakla beraber bünyesindeki suyun kaybolma biçimine de bağlı olarak plastik rötire, hidratasyon rötresi, kuruma rötresi ve karbonatlaşma rötresi gibi rötire tanımlamaları yapılmaktadır.

Araştırma kapsamındaki harç karışımları üzerinde kuruma rötresi ölçümleri yürütülmüş olup, her bir karışımı temsil etmek üzere iki adet rötire numunesi hazırlanmıştır. Bulunan rötire değerleri bu iki numunenin ortalaması alınarak sunulmuştur. Söz konusu harç karışımları için 0.30, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarında elde edilen rötire değerleri sırasıyla Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere artan su/bağlayıcı oranı tüm harç karışımlarının rötire değerlerinde bir artışa neden olmuştur. Öte yandan, %20 ve %40 oranlarında cüruf katkısının rötire değerlerini normal Portland çimentolu karışıma

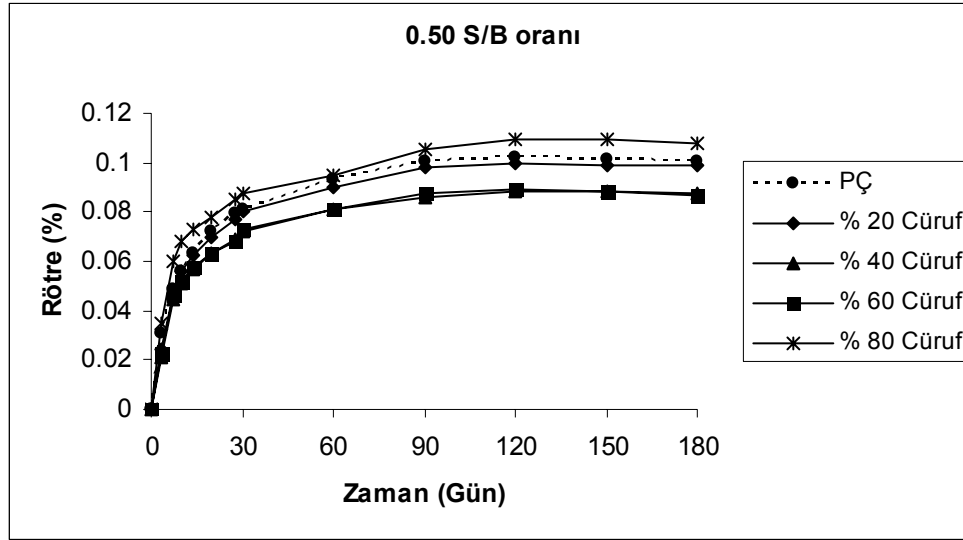
göre fazla etkilemediği, ancak, çimentonun %60 ve %80 gibi yüksek ikame oranlarında cüruf ile yer değiştirilmesinin rötreyi genel olarak arttırıcı bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Elde edilen sonuçlar literatürle de uyum içerisinde olup, Chern ve Chan (1989), normal Portland çimentolu betonların rötşe şekli-zaman eğrilerinin, yüksek fırın cürufu içeren betonlarınkilerle benzer olduğunu fazla miktarda cüruf kullanımının ağırlık kaybını ve rötreyi arttırdığını bildirmişlerdir.



Şekil 4.28. 0.30 su/bağlayıcı oranına sahip harçların rötşe-zaman ilişkisi



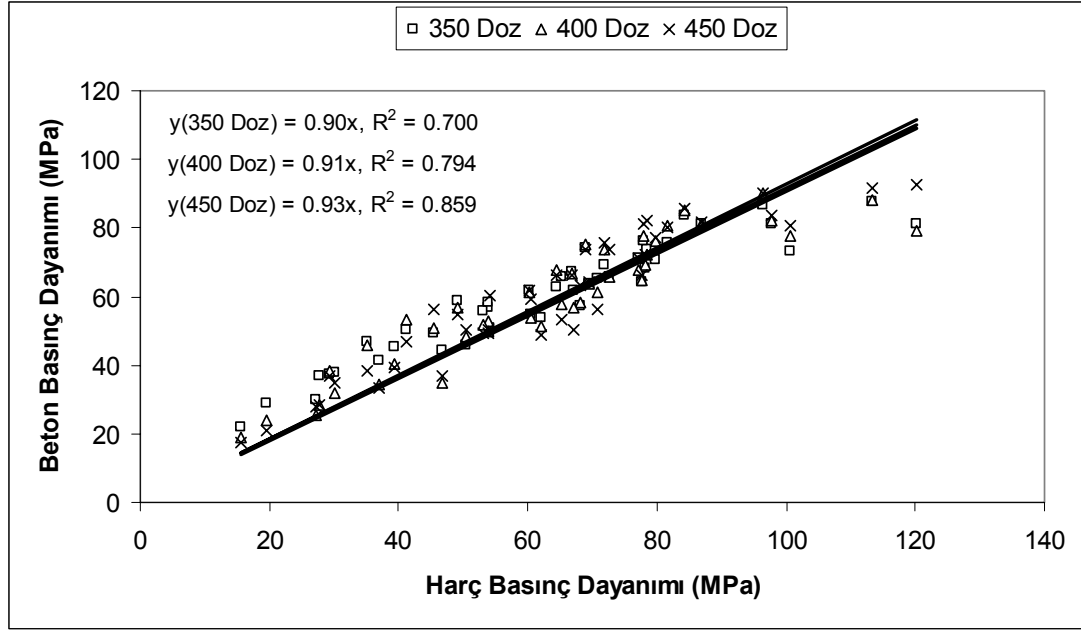
Şekil 4.29. 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip harçların rötşe-zaman ilişkisi



Şekil 4.30. 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip harçların rötre-zaman ilişkisi

4.3. Harç Numune Basınç Mukavemetleri ile Beton Numune Basınç Mukavemetlerinin Karşılaştırılması

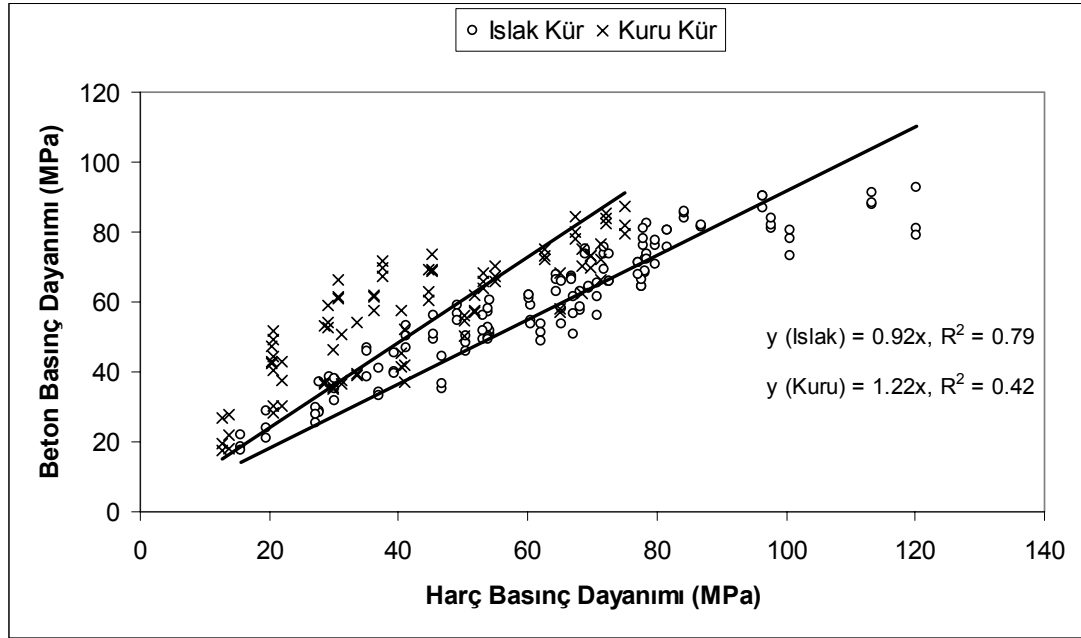
Bu bölümde araştırma kapsamında yer alan harç numuneler ile beton numunelerin basınç dayanımları arasında bir ilişki araştırılmıştır. Su/bağlayıcı oranının 0.30, 0.40 ve 0.50, ilave edilen cüruf miktarının ise %0, %20, %40, %60 ve %80 olduğu harç numuneler ile aynı su/bağlayıcı ve cüruf oranına sahip beton numunelerin basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Çimento dozajına göre beton basınç mukavemetleri ile harç numune basınç mukavemetleri arasındaki ilişki Şekil 4.31'de verilmektedir. Çimento miktarındaki artışla birlikte, harç numune ile beton numune basınç dayanımları arasındaki ilişkinin uyumu daha da artmaktadır. Çimento miktarının 350 kg/m^3 olması durumunda, harç numune basınç mukavemetini 0.90 katsayısı ile çarparak beton numunesinin basınç mukavemeti bulurken, çimento miktarının 400 ve 450 kg/m^3 olması durumunda bu katsayılar sırasıyla 0.91 ve 0.93 olmaktadır.



Şekil 4.31. Dozaja göre harç ile beton numune basınç mukavemetleri ilişkisi

Farklı kür şartlarına maruz bırakılmış harç ve beton numunelerin basınç dayanımları arasındaki ilişki ise Şekil 4.32’de verilmektedir. Şekil 4.32’de, 28 ve 90 gün süresince kuru ortamda bekletilen beton ve harç numune basınç mukavemetleri arasında korelasyon katsayısı 0.42 olan lineer bir ilişki ortaya çıkmıştır. Islak ortamda bekletilen numuneler arasındaki lineer ilişkinin korelasyon katsayısı ise 0.79 olmuştur. Burada dikkati çeken nokta, harç numune basınç dayanımından yola çıkılarak tahmin edilecek olan beton numune basınç dayanımının kuru kür durumunda 1.22, ıslak kür durumunda ise 0.92 katsayısı ile çarpılarak elde edilecek olmasıdır. Kuru kür edilen harç numuneler aynı ortamda küre tabi tutulan beton numunelere göre kür şartlarından daha fazla etkilenmişlerdir. Dolayısıyla kuru ortamda kür edilen harç numune basınç mukavemetini ıslak ortamda kür edilen harç numune basınç mukavemetinden daha büyük bir katsayı ile çarpılarak beton numunelere ait basınç mukavemeti değerleri tahmin edilebilmektedir. Araştırma kapsamındaki harç karışımlarının basınç mukavemetleri, 4x4x4 cm boyutlarındaki küp numunelerden elde edilirken, beton karışımlarının basınç mukavemetleri ise 15x15x15’lik küp numunelerden elde edilmiştir. Kuru ortamda, harç numunesinin içerisinde bulunan su maksimum 2 cm yol alarak serbest kalırken, beton numune

içerisindeki suyun buharlaşması için alması gereken yolun uzunluğu 7.5 cm'dir. Beton için, içerideki suyun alması gereken yolun uzunluğundan dolayı, zaman içerisinde çimentonun hidratasyonu devam etmekte, ancak harç numune ise suyun buharlaşması, mesafenin kısalığından dolayı çabuk olmakta ve harç içerisinde gerekli miktarda su kalmadığından çimentonun hidratasyonu yetersiz kalmaktadır. Bu durum, kuru kür edilen harç numune basınç mukavemetlerinin, ıslak kür edilen harç numune basınç mukavemetlerinden daha büyük bir katsayı ile çarpılarak beton numune basınç mukavemetlerinin bulunmasını açıklamaktadır.



Şekil 4.32. Farklı kür şartlarına maruz bırakılmış harç numune ile beton numune basınç mukavemetleri ilişkisi

4.4. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürüflu Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneyler ve Sonuçları

Alkalilerle aktive edilmiş cürüflu betonlar, bağlayıcı madde olarak Portland çimentosunun yerine %100 öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının beton içerisinde kullanılması ve alkali aktivatörler ile aktive edilmesi suretiyle elde edilmektedir (Collins ve Sanjayan, 2001). Cüruf aktivasyonunda kullanılan kimyasal aktivatörler, sahip oldukları anyonlarının yardımıyla cürufu sürekli olarak çözmektedirler. Bu anyonlar, cüruftan gelen Ca^{+2} iyonları ile kimyasal olarak reaksiyona girerek hidratasyon ürünlerini meydana getirmekte ve oluşan bu hidratasyon ürünleri, hamur içerisinde süreklilik sağlayacak bir ağ yapısı oluşturmak suretiyle bağlayıcı madde hamuruna dayanım kazandırmaktadır.

Alkali katyonlar (R^+), farklı tip anyonlar ile birleşerek alkali bileşikleri meydana getirirler. Cürufların aktivasyonunda kullanılan bu alkali bileşiklerin yapısında bulunan anyonlar ve alkali katyonlar, aktive ettikleri cüruf katkılı çimentoların hidratasyonunu üç şekilde etkilemektedir:

1. Başlangıç safhasında R^+ iyonları, katyonların karşılıklı yer değişimine iştirak ederek reaksiyonda katalizör olarak görev yapmaktadır.

$$\equiv\text{Si-O}^- + \text{R}^+ \rightarrow \equiv\text{Si-O-R}$$

$$\equiv\text{Si-O-R} + \text{OH}^- \rightarrow \equiv\text{Si-O-R-OH}$$

$$\equiv\text{Si-O-R-OH} + \text{Ca}^{+2} \rightarrow \equiv\text{Si-O-Ca-OH} + \text{R}^+$$
2. Alkali bileşiğin anyonları, cürufun yapısında bulunan Ca-O, Si-O, Al-O ve Mg-O gibi atomlar arası kovalent bağları kırabilmek için gerekli iyonik gücü sağlamaktadır.
3. Alkali katyonlar, hidratasyonun daha sonraki safhalarında da, hidratasyon ürünlerinin yapısal gelişimine iştirak etmektedir.

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, yalnızca erken yaşta değil aynı zamanda sonraki yaşlarda da katı çözelti üretme yoluyla hidratasyon ürünlerinin yapısal gelişimine iştirak etmektedir. Öte yandan, hidratasyon ürünlerinin yapısına dahil

olmuş Na^+ iyonları, Li^+ , Na^+ ve K^+ iyonları arasında miktarı en çok olandır (Wang ve Pu, 1992).

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).

Çalışmada kullanılan aktivatörler pH değerlerine göre, büyükten küçüğe doğru; NaOH, cam suyu ve Na_2CO_3 olarak sıralanmaktadır. NaOH çözeltisi, yalnızca Ca-O ve Mg-O bağları değil aynı zamanda önemli miktardaki Si-O ve Al-O gibi kovalent bağların kırılmasını da sağlayacak yüksek OH^- konsantrasyonuna sahiptir. Aktivatör olarak NaOH kullanıldığı takdirde cüruf, çözeltinin sahip olduğu yüksek pH değerinin yardımıyla hızlı bir şekilde çözülmekte ve ana ürün olarak bağlayıcı madde hamurunun çabuk priz yapmasından sorumlu C-S-H jellerini meydana getirmektedir.

Aktivatör olarak cam suyu kullanılması durumunda, cüruftan gelen Ca^{+2} iyonları, hızlı bir şekilde çözeltinin silikat iyonları ile reaksiyona girerek hamurun donmasını sağlayan başlangıç kalsiyum silika hidratenin çökmesine yol açmaktadır. Sonraki yaşlarda ise, ana ürün olarak yüksek polimerizasyon derecesine sahip kalsiyum silika hidrate oluşur.

Kullanılan diğer aktivatörlere göre sahip olduğu pH değerinin daha küçük olmasından dolayı, Na_2CO_3 ile aktive edilen cürufların çözülme süreçleri daha yavaş olmaktadır. Aktivatör olarak Na_2CO_3 kullanıldığı takdirde, Ca-O bağları kırılmakta ve cüruftan gelen Ca^{+2} iyonları, aktivatörün $[\text{CO}_3]^{-2}$ iyonlarıyla reaksiyona girerek, sertleşme olmaksızın ortaya çıkan plastiklik kaybından sorumlu CaCO_3 'ı meydana getirmektedir. Nispeten daha geç yaşlarda ise bağlayıcı madde hamurunun priz yapmasından sorumlu olan kalsiyum silika hidrate çökelmektedir.

Alkali bileşiğin pH değeri, alkalilerle aktive edilmiş cürufu betonların mukavemeti ile tam olarak ilişkili değildir. Ancak, aktivatör çözeltisinin pH değeri, priz zamanlarını belirlemekte, karışımların mukavemetlerindeki farklılıklara ise aktivatörlerin sahip oldukları anyon tipleri katkı sağlamaktadır. Değişik anyonların

rollerindeki bu farklılık, hidratasyon ürünlerinin polimerizasyon derecesi, tipleri ve cüruf reaktivitesi ile ifade edilen aktivasyon yeteneğindeki farklılıklarla kendini göstermektedir. Bununla birlikte, farklı anyonlara sahip değişik tipteki aktivatörler ile aktive edilmiş cürufli betonların mukavemetlerindeki ayrılık, esas olarak, hidratasyon ürünlerinin kendi karakteristiklerindeki farklılıktan ve bağlayıcı madde hamurlarındaki boşluk dağılımından kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle, çözülen cürufun ya da meydana gelen hidratasyon ürünlerinin miktarı, değişik tipteki aktivatörler ile aktive edilmiş cürufli betonların mukavemetleriyle ilişkili bir parametre olarak kabul edilememektedir (Wang ve Pu, 1992).

Daha önce de bahsedildiği gibi, alkalilerle aktive edilmiş cürufli betonlar, %100 öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının alkali aktivatörler ile aktifleştirilmesi sonucu elde edilmektedir. Ancak bu çalışmada, değişen oranlarda cüruf katkısı içeren Portland çimentosu/cüruf sistemlerinin aktivasyonu üzerine de bir araştırma yapılmış, sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sıvı sodyum silikat (cam suyu) gibi kimyasal maddelerle aktive edilmiş cürufli harçların 7, 28, 90 ve 180 günlük dayanım ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir.

Araştırma kapsamındaki harçların aktivasyonu için, ağırlıkça cüruf miktarına göre %4, %6 ve %8 gibi üç farklı Na^+ konsantrasyonu üzerinde çalışma yapılmış, %4'ün altındaki Na^+ konsantrasyonları, ilk 24 saatlik hidratasyon esnasında cüruf için yeterli aktivasyonu sağlamadığından, aktivasyon için gerekli en düşük sodyum seviyesi %4 olarak seçilmiştir. Cam suyu ile aktivasyonda, çözelti içerisinde 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50 gibi dört ayrı silikat modülü (M_s) elde edebilmek amacıyla, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit farklı oranlarda karıştırılmış, 0.50 olan su/bağlayıcı oranını sabit tutabilmek için, çözeltideki su miktarı da göz önüne alınarak, harç karışımlarına eklenecek su miktarlarında eksiltme yoluyla ayarlamaya gidilmiştir.

Bu amaç doğrultusunda hazırlanarak %65 bağıl neme sahip $22 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki ortamda kür edilen sertleşmiş harç numuneleri üzerinde basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, karbonatlaşma ve rötire deneyleri yürütülmüş, elde edilen sonuçlar tartışılarak sunulmuştur.

4.4.1. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürüflu Harç Numunelerin Basınç Dayanımları

Çalışma kapsamında yer alan %4, %6 ve %8 olmak üzere üç farklı Na^+ konsantrasyonunda hazırlanmış değişik tipteki alkali aktivatörler ile aktive edilen farklı ikame oranlarındaki cüruf katkılı harçların 7, 28, 90 ve 180 günlük basınç dayanımları, Çizelge 4.38’de sunulmuştur.

Çizelge 4.38. Farklı Na dozajlarına sahip alkaliler ile aktive edilmiş değişik ikame oranlarındaki cürüflu harçların basınç dayanımları (MPa)

İkame Oranı	Aktivatör Tipi	Konsantrasyon	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün
%20 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	18.2	25.1	23.4	26.9
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	15.6	19.7	20.8	21.7
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	13.3	17.5	21.5	22.3
	NaOH	%4 Na	23.7	28.7	31.0	35.0
	NaOH	%6 Na	17.3	24.7	27.1	29.3
	NaOH	%8 Na	14.4	21.4	23.1	26.0
	Na_2CO_3	%4 Na	23.9	30.3	32.1	36.7
	Na_2CO_3	%6 Na	20.1	26.0	28.4	30.3
	Na_2CO_3	%8 Na	20.7	23.6	25.3	27.7
%40 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	11.8	21.9	23.6	24.3
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	13.1	24.0	27.8	28.9
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	17.6	29.2	31.1	33.1
%60 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	14.7	23.3	24.8	25.4
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	18.1	28.6	39.7	41.9
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	25.6	39.3	50.6	51.7
%80 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	18.4	27.5	35.1	37.8
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	45.3	57.1	60.0	62.1
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	58.3	70.1	69.0	73.1
	NaOH	%4 Na	8.0	12.5	19.4	20.2
	Na_2CO_3	%4 Na	14.0	18.4	23.5	24.6
%100 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	31.1	35.5	37.6	38.4
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	62.7	71.7	74.4	77.6
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	67.0	81.1	84.2	85.1

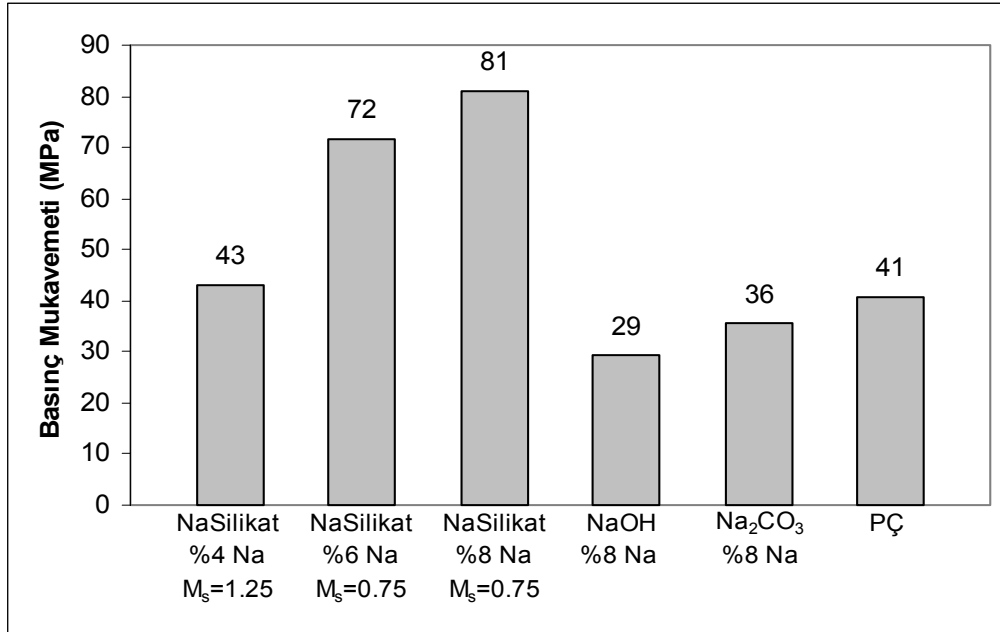
Çizelgeden görüldüğü üzere, %20 oranında cüruf katkısı içeren harçların aktivasyonunda artan Na^+ miktarı, dayanımları olumsuz etkilemesine rağmen, artan yer değişim oranıyla birlikte bu olumsuzluk ortadan kalkmakta ve belirli bir yer değişim oranı için karışım içerisindeki sodyum konsantrasyonunun yükselmesi, dayanımları arttırmaktadır. Öte yandan, sabit bir sodyum konsantrasyonu için, artan cüruf yer değişim oranı, dayanımlarda bir artış sağlamakta ve maksimum dayanımlar, çizelgeden de görüldüğü üzere, hiç Portland çimentosu içermeyen %100 cüruf katkılı harç karışımlarıyla elde edilmektedir. Portland çimentosu/cüruf sistemlerinin aktivasyon karşısında gösterdiği bu düşük mukavemet, çimentoyla suyun meydana getirdiği hidratasyon ürünlerine kıyasla, oluşturduğu daha boşluklu bir yapı nedeniyle önemli miktarda kalsiyum hidroksitin ve Na içeren C-S-H jellerinin (N-C-S-H) gelişmesine neden olan alkali aktivatörlerin, çimento hidratasyonu üzerindeki olumsuz etkisinden ileri gelmektedir (Bakharev ve ark., 1999).

Çizelge 4.39'da, çeşitli Na^+ dozajlarına sahip farklı tip alkali aktivatörler ile aktive edilmiş ve hiç Portland çimentosu içermeyen %100 cüruf katkılı harç karışımlarının, kontrol karışımıyla birlikte belirli zaman dilimlerindeki basınç dayanımları verilmektedir. Çizelgedeki değerler, su/bağlayıcı oranı 0.50 olan ve %65 bağıl neme sahip $22 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki ortamda kür edilen harç numunelerinden elde edilmiştir. Görüldüğü üzere, cürufların alkaliler ile aktivasyonunda en etkili aktivatör, sıvı sodyum silikat olup, üç farklı aktivatörün kullanılması sonucu elde edilen mukavemet değerleri, 17 ila 86 MPa arasında değişmiş ve sodyum silikat çözeltisinin kullanılmasıyla 80 MPa'dan daha yüksek harç basınç mukavemetleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.39. Alkalilerle aktive edilmiş cürüflu harçların basınç dayanımları (MPa)

İkame Oranı	Aktivatör Tipi	Konsantrasyon	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün
%100 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	31.1	35.5	37.6	38.4
	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=1.00$	33.4	41.2	42.0	43.3
	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=1.25$	35.2	42.9	47.4	48.1
	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=1.50$	32.5	38.6	42.0	45.5
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	62.7	71.7	74.4	77.6
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=1.00$	62.0	71.3	72.5	76.0
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=1.25$	50.1	56.8	58.4	60.8
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=1.50$	39.9	48.4	51.2	53.9
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	67.0	81.1	84.2	85.1
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=1.00$	66.7	80.9	85.6	86.3
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=1.25$	52.3	58.9	62.6	64.2
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=1.50$	47.3	57.5	59.2	60.9
	NaOH	%4 Na	19.7	23.9	23.2	25.9
	NaOH	%6 Na	22.7	26.2	31.1	31.9
	NaOH	%8 Na	22.1	29.2	33.2	34.8
	Na ₂ CO ₃	%4 Na	16.8	24.7	26.4	29.6
	Na ₂ CO ₃	%6 Na	21.7	27.6	28.3	32.9
	Na ₂ CO ₃	%8 Na	24.7	35.7	37.3	42.1
PÇ	—	—	36.4	40.8	40.4	41.9

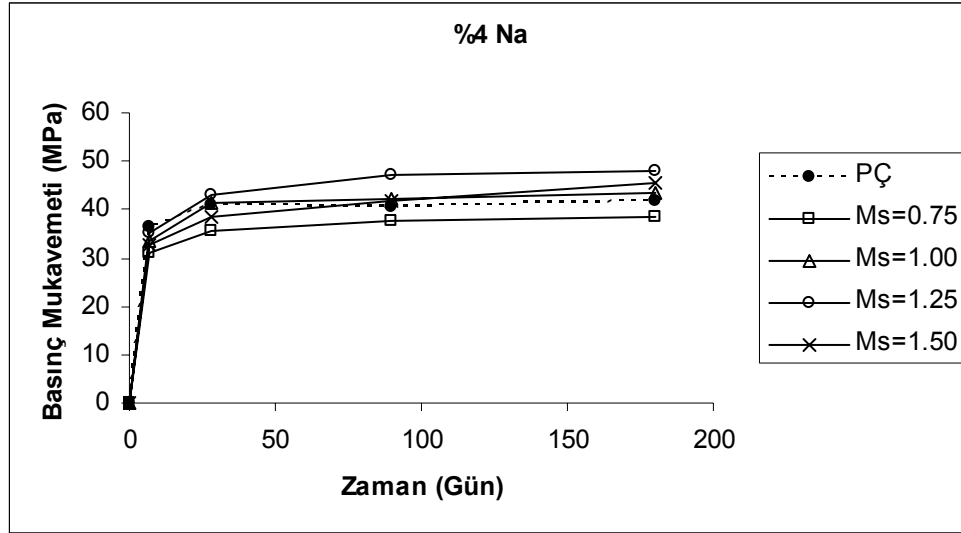
Alkalilerle aktive edilmiş cüruf katkılı harçlar için 28 günlük hidratasyon sonrasındaki basınç mukavemetlerinin verildiği Şekil 4.33, cüruf aktivasyonunda sodyum silikat çözeltisinin ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Şekilden, aynı ortamda kür edilen ve eşit su/bağlayıcı oranına sahip normal Portland çimentolu kontrol harcının bile 28 günün ardından, cam suyu ile aktive edilen cüruf katkılı harç dayanımlarından daha düşük değerler aldığı görülmektedir.



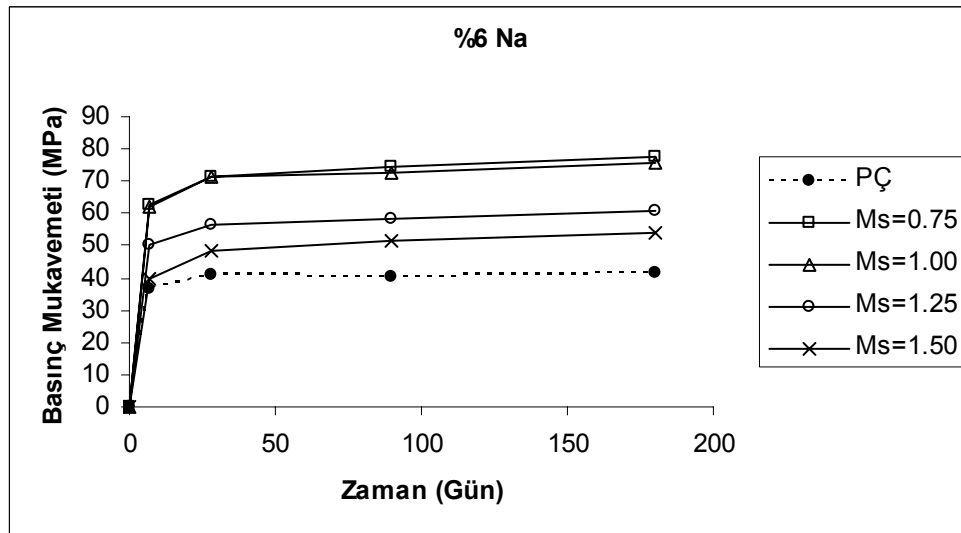
Şekil 4.33. Alkalilerle aktive edilmiş cürüflu harçların 28 günlük basınç dayanımları

Alkaliler ile aktive edilmiş cürüflu sistemlerin son mukavemetlerinin, aktivasyon derecesine bağlı olduğu ve değişik tipteki aktivatörler ile farklı mukavemet gelişimlerinin elde edildiği bilinmektedir. Bakharev ve ark. (1999), cürüfların, aynı Na^+ miktarına sahip aktivatörlerdeki anyon (negatif iyon) ya da anyon gruplarına doğru seçicilik gösterdiğini, aktivatörlerin negatif iyonlarının, cüruftan çözülen Ca^{+2} iyonları ile reaksiyona girerek alkali cürüflu çimentoların ilave hidratasyonunda önemli bir yer tuttuğunu bildirmiştir. Aktivatör çözeltisinin başlangıç pH'ı, cürufun çözülmesinde ve bazı hidratasyon ürünlerinin erken gelişiminde önemli bir role sahiptir. Ancak, alkali-cürüflu 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 cürüfların hidratasyon karakteristikleri, aktivatör çözeltisinin başlangıç pH'ından ziyade aktivatörlerin anyon ya da anyon gruplarına daha çok bağlı olmaktadır (Shi ve Day, 1995).

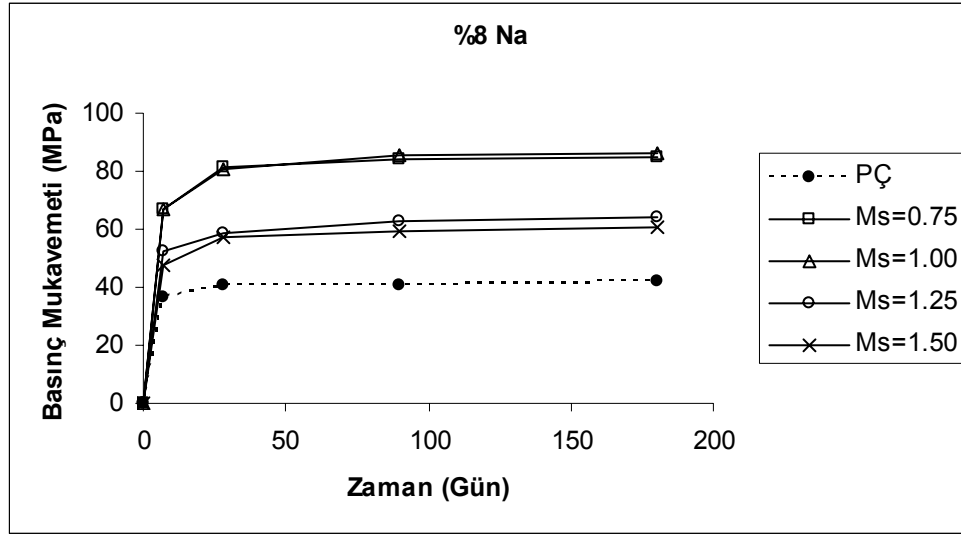
Hiç cüruf katkısı içermeyen normal Portland çimentolu kontrol harcının mukavemeti ile birlikte, 0.75'ten 1.50'ye kadar değişen modüllerdeki sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cürufli harçların basınç mukavemetleri, %4, %6 ve %8 Na^+ dozajları için sırasıyla Şekil 4.34a, 4.34b ve 4.34c'de gösterilmektedir.



Şekil 4.34a. %4 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cürufli harçların basınç dayanımları



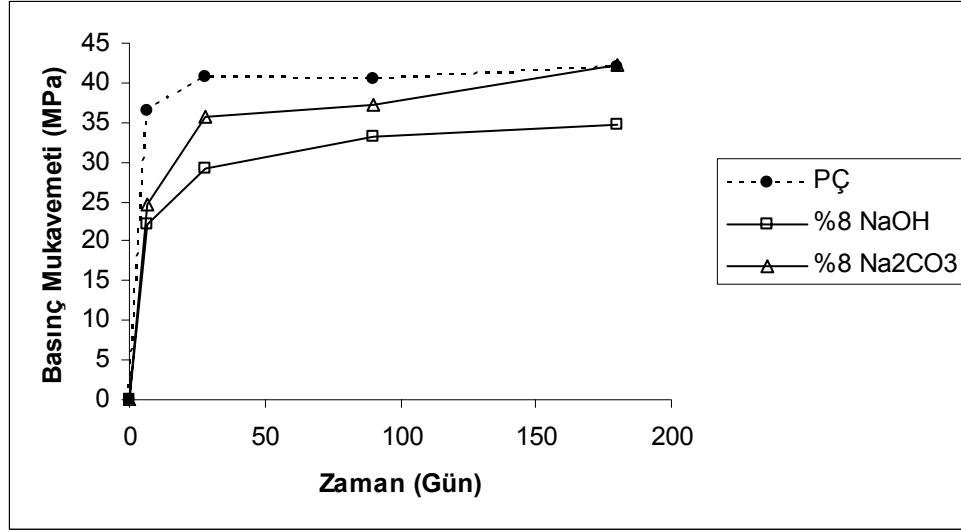
Şekil 4.34b. %6 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cürufli harçların basınç dayanımları



Şekil 4.34c. %8 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruflu harçların basınç dayanımları

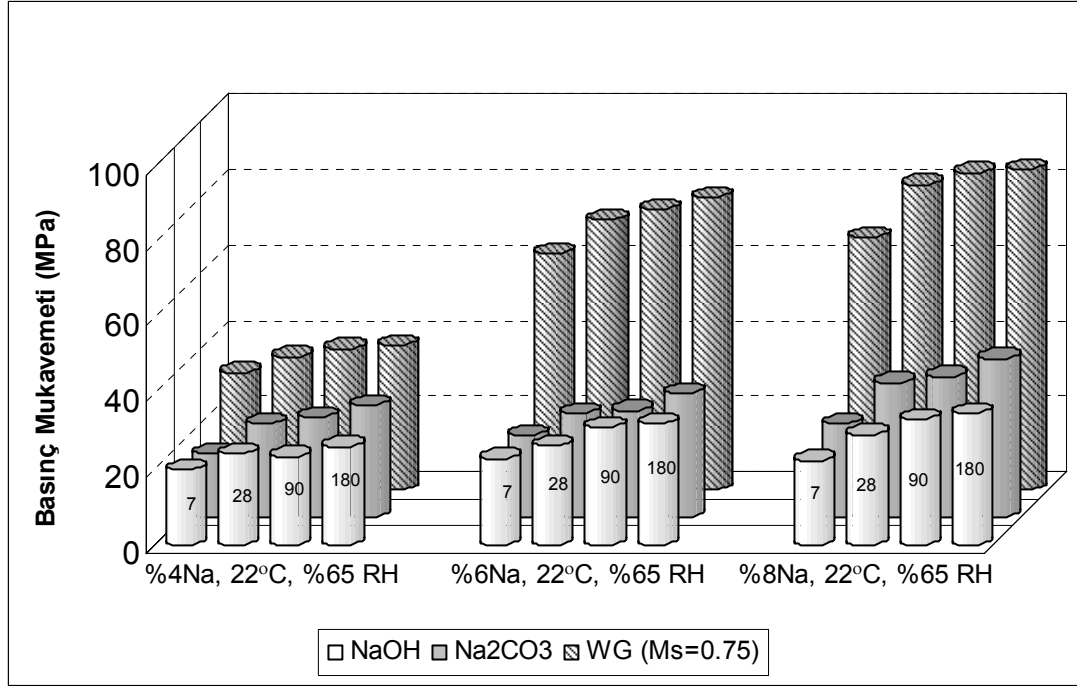
Şekillerden de görüldüğü üzere, karışım içerisindeki sodyum konsantrasyonunun yükselmesiyle dayanımlar artmakta ve sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruflar, üç ayrı Na konsantrasyonu için, aynı su/bağlayıcı oranına sahip Portland çimentolu kontrol harcının dayanımından daha yüksek dayanımlar sergilemektedir.

Diğer aktivatörlerin mukavemet gelişimi üzerindeki etkileri, sodyum silikat çözeltisi kadar belirgin değildir. NaOH ve Na₂CO₃ ile aktive edilmiş cüruflar katkılı harçların basınç dayanımlarının gösterildiği Şekil 4.35'ten, %8 gibi yüksek bir Na oranında, NaOH ve Na₂CO₃ ile aktive edilmiş cüruflar katkılı harçların basınç dayanımlarının, aynı kür şartlarında normal Portland çimentosuyla üretilmiş kontrol harcının dayanımlarına göre daha düşük değerler aldığı görülmektedir. Erken yaşlarda, Na₂CO₃ yerine NaOH ile aktive edilen cüruflar daha iyi mukavemet vermekte, bu daha düşük mukavemet gelişimi ve aktivasyon hızı, Na₂CO₃'ün daha düşük pH değerine sahip olmasından ileri gelmektedir. Ancak daha sonraki yaşlarda, Na₂CO₃'tan gelen CO₃⁻² iyonları, kalsiyum hidrokarboalüminat (C₃A.CaCO₃.12H₂O) formundaki karbonat bileşimlerinin gelişmesine yol açarak NaOH'e göre daha yüksek mukavemet gelişimi sağlamaktadır (Jimenez ve ark., 1999).



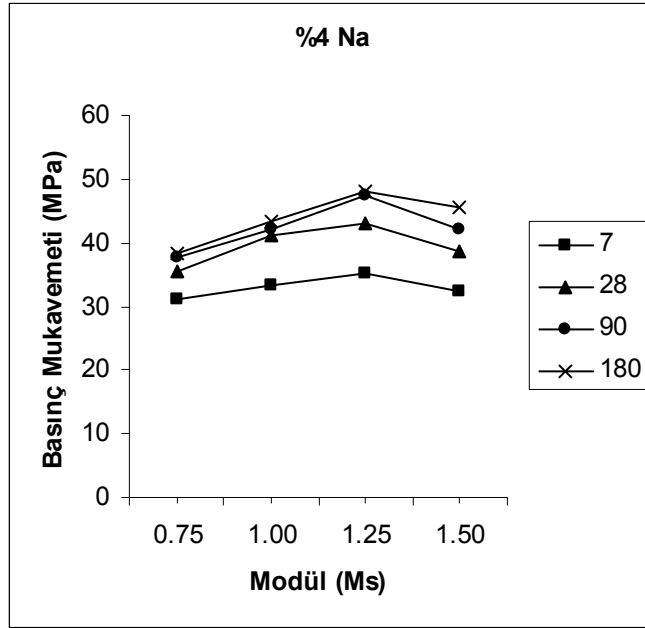
Şekil 4.35. NaOH ve Na₂CO₃ ile aktive edilmiş harçların basınç dayanımları

Değişen Na konsantrasyonları için, üç ayrı kimyasal ile aktive edilmiş cüruf katkılı harçların basınç dayanımlarının verildiği Şekil 4.36, cürufun alkaliler ile aktivasyonu için, çalışmada kullanılan aktivatörler arasında sodyum silikat çözeltisinin diğer aktivatörlere göre ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen cürufların gösterdiği bu daha yüksek mukavemet, alkali cüruf katkılı karışımlardaki silikat anyonlarının polimerizasyon derecesi ile açıklanmaktadır. Bir başka deyişle, sodyum silikat ile aktive edilen cürufların bağlayıcı madde hamurlarındaki polimer miktarları daha fazla olup, silikat anyonlarının (SiO_3^{-2}) polimerleşme hızlarındaki ayrılık, mukavemetlerde ortaya çıkan bu farklılığa önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (Wang ve Pu, 1992).

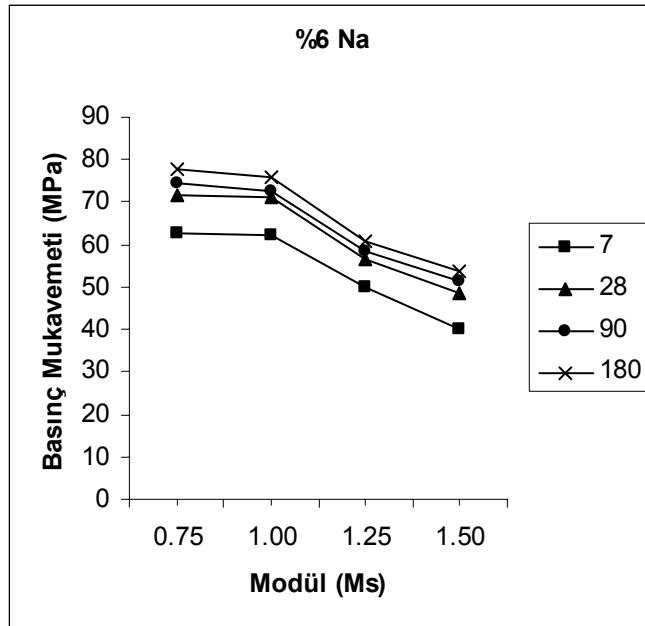


Şekil 4.36. Üç farklı aktivatör ile aktive edilmiş cürufllu harçların basınç dayanımları

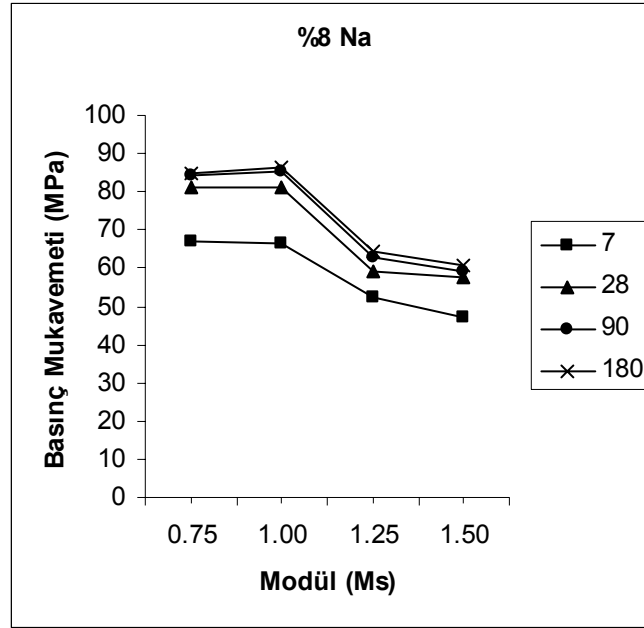
Cüruf aktivasyonunda, sıvı sodyum silikat çözeltisinin etkisini daha da araştırmak amacıyla yapılan diğer bir çalışmada, sıvı sodyum silikat ile aktive edilen cürufllu harçların, 0.75'ten 1.50'ye kadar değişen silikat modüllerine karşılık gelen basınç mukavemetleri, %4, %6 ve %8 Na konsantrasyonları için sırasıyla Şekil 4.37a, 4.37b ve 4.37c'de verilmiştir. Görüldüğü üzere, %4 Na konsantrasyonuna sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen cürufllu harçların basınç dayanımları, yükselen silikat modülüyle birlikte artış sergilerken, %6 ve %8 gibi yüksek Na konsantrasyonundaki cürufllu harçların dayanımları, modül artışına bağlı olarak ortaya çıkan yüksek rötre deformasyonlarının meydana getirdiği çatlaklar sonucu azalma göstermektedir. Islak kür eksikliği de, bu çatlakların gelişmesi sonucu mukavemetin düşmesinde etkili olmaktadır. Genel olarak tüm konsantrasyon seviyeleri için maksimum dayanım, 0.75 ve 1.00 gibi düşük modüllere sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktifleştirilmiş cürufllu harçlardan elde edilmiştir.



Şekil 4.37a. %4 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cürüflu harçların basınç dayanımları üzerine silikat modülünün etkisi



Şekil 4.37b. %6 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cürüflu harçların basınç dayanımları üzerine silikat modülünün etkisi



Şekil 4.37c. %8 Na dozajına sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruflu harçların basınç dayanımları üzerine silikat modülünün etkisi

Bakharev ve ark. (1999)'nın bildirdiğine göre Ramachadran (1995), $R = Na$, K ve Li olmak üzere, yakıcı alkaliler (ROH), zayıf asitlerin silikat içermeyen tuzları (R_2CO_3 , R_2SO_3 , R_2S , R_3PO_4 veya RF) ve $R_2O(n)SiO_2$ formundaki silikat tuzları gibi kimyasalların cüruf aktivasyonunda kullanılabilecek üç tip aktivatör olduğunu belirtmiştir. Bazik cüruflar için her üç aktivatör de kullanılabilirken, nötr veya asit karakterli cürufların aktivasyonu için, düşük mukavemet vermelerinden dolayı, zayıf asitlerin silikat içermeyen tuzları arzu edilmemektedir. Araştırma kapsamındaki harçlarda kullanılan cüruf nötre yakın olup, baziklik katsayısı 0.84'tür. Çalışmada, Na_2CO_3 ile aktive edilen cüruf katkılı harç karışımlarından elde edilen düşük basınç mukavemeti değerlerinin, nötr cüruflarda, zayıf asitlerin silikat içermeyen tuzlarının iyi aktivasyon vermediği teorisini desteklediği görülmektedir.

Elde edilen sonuçların ışığında, kullanılan üç aktivatör, bağlayıcı madde hamurunun boşluk yapısıyla bağlantılı olarak, sağladıkları mekanik mukavemetlerine göre büyükten küçüğe doğru; sodyum silikat çözeltisi $> Na_2CO_3 > NaOH$ şeklinde sıralanmaktadır.

4.4.2. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürüflu Harç Numunelerin Eğilmede Çekme Dayanımları

Çalışma kapsamında yer alan %4, %6 ve %8 olmak üzere üç farklı Na^+ konsantrasyonunda hazırlanmış değişik tipteki alkali aktivatörler ile aktive edilen farklı ikame oranlarındaki cüruf katkılı harçların 7, 28, 90 ve 180 günlük eğilme dayanımları, Çizelge 4.40'ta sunulmuştur.

Çizelge 4.40. Farklı Na dozajlarına sahip alkaliler ile aktive edilmiş değişik ikame oranlarındaki cürüflu harçların eğilme dayanımları (MPa)

İkame Oranı	Aktivatör Tipi	Konsantrasyon	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün
%20 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	2.0	3.1	3.5	3.6
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	1.7	2.7	2.8	3.0
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	1.6	2.5	3.0	3.5
	NaOH	%4 Na	2.4	4.2	4.3	4.5
	NaOH	%6 Na	1.9	3.1	3.8	4.3
	NaOH	%8 Na	1.7	2.4	3.6	4.3
	Na_2CO_3	%4 Na	2.8	4.7	5.0	4.7
	Na_2CO_3	%6 Na	2.1	2.9	4.4	4.6
	Na_2CO_3	%8 Na	2.4	2.5	4.2	4.3
%40 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	1.8	2.2	4.2	4.2
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	1.9	2.6	4.2	4.3
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	2.0	2.8	4.4	4.4
%60 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	1.9	2.4	2.8	2.9
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	2.7	2.4	4.1	4.2
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	3.0	3.4	5.3	5.3
%80 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	2.7	2.8	3.1	4.8
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	4.5	5.9	6.2	6.6
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	6.4	6.7	6.8	7.0
	NaOH	%4 Na	1.8	1.6	1.6	1.7
	Na_2CO_3	%4 Na	2.4	2.5	2.8	2.8
%100 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	3.0	3.2	3.1	3.7
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	5.9	6.1	6.2	6.3
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	5.9	6.2	6.4	6.5

Çizelgeden görüldüğü üzere, %20 oranında cüruf katkısı içeren harçların aktivasyonunda artan Na^+ miktarı, eğilme dayanımlarını olumsuz etkilemesine rağmen, bu olumsuz etki, artan yer değişim oranıyla birlikte ortadan kalkmakta ve belirli bir yer değişim oranı için karışım içerisindeki sodyum konsantrasyonunun yükselmesi, eğilme dayanımlarını arttırmaktadır. Öte yandan, sabit bir sodyum konsantrasyonu için, artan cüruf yer değişim oranı, eğilme dayanımlarında bir artış sağlamakla birlikte, %100 yer değişim seviyesine gelindiğinde, özellikle %8 gibi yüksek oranda Na içeren cürufli karışımların eğilme dayanımlarında, düşmeler meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, artan cüruf miktarına bağlı olarak ihtiyaç duyulan aktivatör miktarındaki artışın neden olduğu yüksek rötre deformasyonlarının bir sonucudur. Ayrıca, numunelerin içerisinde bulunduğu kuru kür ortamı da, bu rötre deformasyonlarının meydana getirdiği çatlakların gelişmesinde etkin bir rol oynamaktadır. Çizelgeden, maksimum eğilme dayanımlarının, basınç dayanımlarında olduğu gibi, hiç Portland çimentosu içermeyen %100 cüruf katkılı harç karışımlarıyla elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.41, çeşitli Na dozajlarına sahip farklı tip alkaliler ile aktive edilmiş ve hiç Portland çimentosu içermeyen %100 cüruf katkılı harç karışımlarının, kontrol karışımıyla birlikte belirli zaman dilimleri için elde edilen eğilme dayanımlarını göstermektedir. Çizelgeden de görüldüğü üzere, cürufların alkaliler ile aktivasyonunda en etkili aktivatör, sodyum silikat çözeltisi olup, üç farklı aktivatörün kullanılması sonucu elde edilen eğilme mukavemeti değerleri, 2.5 ila 6.8 MPa arasında değişmiş ve sodyum silikat çözeltisinin kullanılmasıyla 6.0 MPa'dan daha yüksek harç eğilme mukavemetleri elde edilmiştir. Çizelgeden, karışım içerisindeki sodyum konsantrasyonunun yükselmesiyle birlikte eğilme dayanımlarının da arttığı ve sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cürufların, %6 ve %8 Na konsantrasyonlarında 0.75 ve 1.00 silikat modülleri için, aynı su/bağlayıcı oranına sahip Portland çimentolu kontrol harcının dayanımından daha yüksek eğilme dayanımları sergilediği görülmektedir. NaOH ve Na_2CO_3 ile aktive edilen harçların eğilmede çekme dayanımları ise üç aktivatör konsantrasyonu için Portland çimentolu kontrol harcının eğilme dayanımlarından daha düşük olmuştur.

Çizelge 4.41. Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu harçların eğilme dayanımları (MPa)

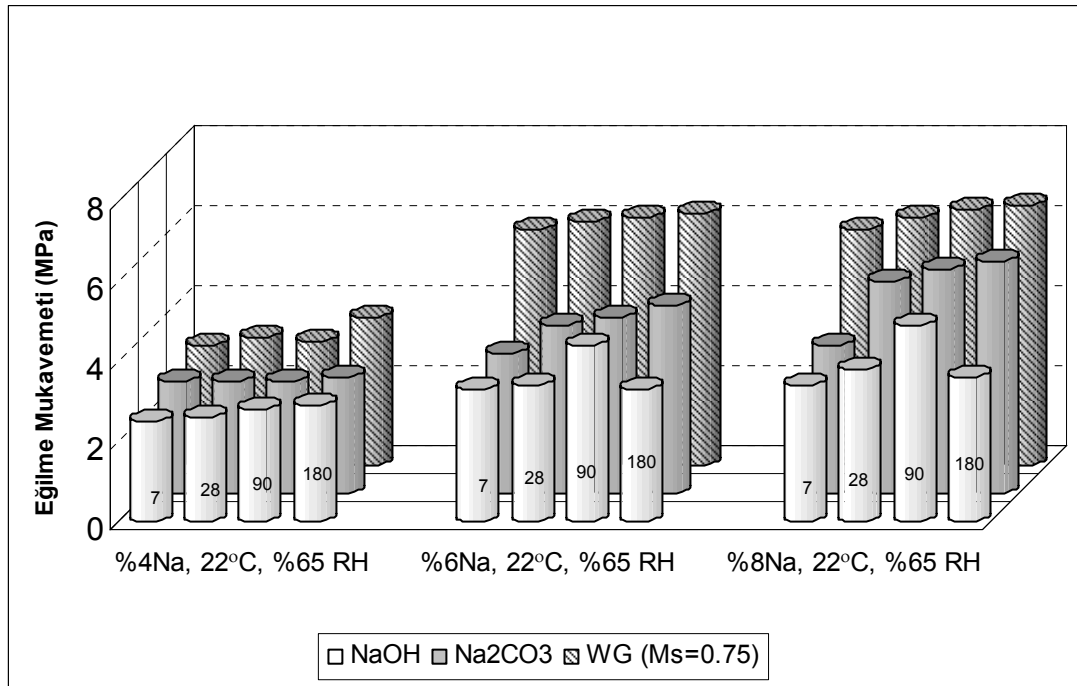
İkame Oranı	Aktivatör Tipi	Konsantrasyon	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün
%100 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	3.0	3.2	3.1	3.7
	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=1.00$	3.2	3.5	3.6	3.8
	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=1.25$	3.9	4.6	5.1	5.2
	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=1.50$	3.5	4.4	4.2	5.1
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	5.9	6.1	6.2	6.3
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=1.00$	6.1	6.8	5.9	5.7
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=1.25$	4.9	5.1	5.5	5.6
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=1.50$	3.4	4.3	4.6	4.7
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	5.9	6.2	6.4	6.5
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=1.00$	6.1	5.9	5.9	6.1
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=1.25$	4.9	5.1	5.6	6.0
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=1.50$	3.4	4.0	4.7	5.4
	NaOH	%4 Na	2.5	2.6	2.8	2.9
	NaOH	%6 Na	3.3	3.4	4.4	3.3
	NaOH	%8 Na	3.4	3.8	4.9	3.6
	Na ₂ CO ₃	%4 Na	2.8	2.8	2.8	2.9
	Na ₂ CO ₃	%6 Na	3.5	4.2	4.4	4.7
	Na ₂ CO ₃	%8 Na	3.7	5.3	5.6	5.8
PÇ	—	—	5.1	4.8	5.5	6.0

Dikkat edilirse, %4 Na konsantrasyonuna sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen cüruflu harçların eğilme dayanımları, yükselen silikat modülüyle birlikte artış sergilerken, %6 ve %8 gibi yüksek Na konsantrasyonundaki cüruflu harçların eğilmede çekme dayanımları, modül artışına bağlı olarak ortaya çıkan yüksek rötre deformasyonlarının meydana getirdiği çatlaklardan dolayı azalma göstermektedir. Bu durum literatürde de bildirilmiş ve Postacıoğlu (1987), rötrenin meydana getirdiği çatlakların, eğilmede çekme mukavemetinin büyük değerler almasına engel olduğunu belirtmiştir.

Öte yandan, kuru kür şartları da, bu rötre deformasyonlarının meydana getirdiği çatlakların gelişmesinde etkili olmaktadır. Bu nedenle, yüksek Na dozajlarına sahip aktivatörler ile aktive edilen numuneler, yeterli sünekliliğe sahip olamadıklarından gevrek malzeme gibi davranmakta ve eğilme dayanımları fazla artış gösterememektedir. Collins ve Sanjayan (2001), ıslak kür eksikliğinin alkali

aktive edilmiş cürüflu betonlarda ölçülen mikro çatlak seviyesini arttırdığını ve aynı zamanda, alkali aktive edilmiş cürüflu betonlardaki mukavemet gelişiminin yetersiz kür şartları nedeniyle önemli ölçüde azalmasından dolayı, yapılarda kullanılması durumunda bu betonların çok iyi kür edilmesinin zorunlu olduğunu bildirmiştir.

Değişen Na konsantrasyonları için, üç ayrı kimyasal ile aktive edilmiş cüruf katkılı harçların eğilme dayanımları Şekil 4.38’de verilmiştir. Şekil 4.38, cürufun alkaliler ile aktivasyonu için, çalışmada kullanılan aktivatörler arasında sodyum silikat çözeltisinin diğer aktivatörlere göre ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Elde edilen eğilmede çekme mukavemeti değerlerine göre kullanılan aktivatörleri, büyükten küçüğe doğru; sodyum silikat çözeltisi > Na_2CO_3 > NaOH şeklinde sıralamak mümkündür.



Şekil 4.38. Üç farklı aktivatör ile aktive edilmiş cürüflu harçların eğilme dayanımları

4.4.3. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cürufllu Harç Numunelerin Karbonatlaşma Değerleri

Karbonatlaşma, beton yüzeyinden başlayarak yavaşça betonun iç kısımlarına doğru ilerleyen bir durabilite problemidir. Beton kalitesinin kesin parametresi boşluk yapısına bağlı olduğundan, betondaki karbonatlaşmanın daha az olabilmesini sağlayabilmek amacıyla yapılması gereken en önemli işlem, betonun mümkün olduğu kadar geçirimsiz bir beton olarak üretilmesidir.

Çalışma kapsamında yer alan %100 oranında cüruf katkısı içeren harçların, %4, %6 ve %8 olmak üzere üç farklı Na^+ konsantrasyonunda hazırlanmış değişik tipteki alkali aktivatörler ile aktifleştirilmesi sonucu elde edilen 7, 28, 90 ve 180 günlük karbonatlaşma değerleri, Çizelge 4.42’de sunulmuştur.

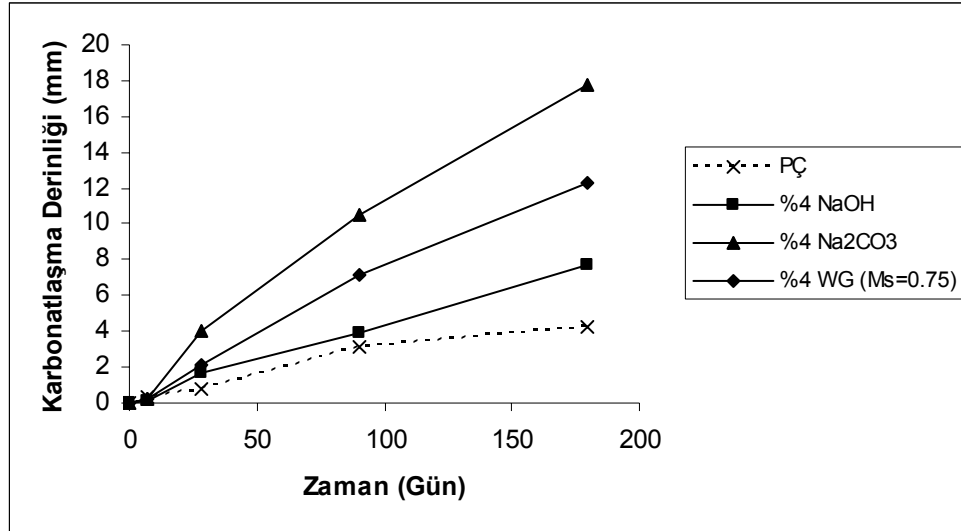
Çizelge 4.42. Alkali aktive edilmiş cürufllu harçların karbonatlaşma değerleri (mm)

İkame Oranı	Aktivatör Tipi	Konsantrasyon	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün
%100 YFC	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=0.75$	0.25	2.15	7.14	12.25
	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=1.00$	0	1.74	6.50	11.69
	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=1.25$	0	1.35	5.27	8.59
	Sıvı sodyum silikat	%4 Na, $M_s=1.50$	0	1.09	4.73	7.78
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=0.75$	0	0.58	3.96	5.26
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=1.00$	0	0.29	3.39	6.35
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=1.25$	0	0.21	2.93	5.90
	Sıvı sodyum silikat	%6 Na, $M_s=1.50$	0	0.14	1.66	4.34
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=0.75$	0	0.50	1.85	4.30
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=1.00$	0	0.35	0.71	3.63
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=1.25$	0	0.25	0.53	2.33
	Sıvı sodyum silikat	%8 Na, $M_s=1.50$	0	0.18	0.40	1.78
	NaOH	%4 Na	0.13	1.73	3.92	7.76
	NaOH	%6 Na	0	1.41	3.04	5.59
	NaOH	%8 Na	0	0.90	2.04	3.09
	Na_2CO_3	%4 Na	0.26	4.04	10.47	17.80
	Na_2CO_3	%6 Na	0	3.04	6.31	10.18
	Na_2CO_3	%8 Na	0	2.25	5.62	9.25
PÇ	—	—	0.38	0.81	3.14	4.20

Çizelgeden de görüldüğü gibi, numune içerisine nüfuz eden daha fazla CO₂ miktarından dolayı, harçların karbonatlaşma değerlerinde zamana bağlı olarak bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca, yapısında bulunan CO₃⁻² iyonlarının cüruftan gelen Ca⁺² iyonları ile birleşerek CaCO₃ kristallerini meydana getirmesi sebebiyle, en yüksek karbonatlaşma değerleri Na₂CO₃ ile aktive edilmiş cüruflu harçlardan elde edilmiştir. Öte yandan, artan Na⁺ dozajı ile birlikte karbonatlaşma değerlerinde bir azalma olduğu ve bu durumun muhtemel nedeninin artan Na⁺ dozajına bağlı olarak boşluk çözeltisinde meydana gelen nispeten daha yüksek seviyedeki pH ortamından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sodyum silikat çözeltisiyle aktive edilen harçlarda da yükselen silikat modülü (M_s) ile benzer bir durum ortaya çıkmakta ve karbonatlaşma, artan M_s modülüyle birlikte daha düşük değerler almaktadır.

Çizelge 4.42'den, alkalilerle aktive edilmiş cüruf katkılı harçlarda yer alan karbonatlaşmanın, Portland çimentosuna göre daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonlar, karbondioksit (CO₂) bakımından zengin bir ortama maruz bırakıldıkları zaman, bağlayıcı madde hamurlarında, kalsiyum karbonat (CaCO₃) kristallerinin oluşması, boşluk çözeltisinin pH seviyesinde bir azalma ve C-S-H jellerinden kirecin ayrışması gibi kimyasal değişimler gözlenmektedir. Cüruflu betonların Ca⁺² muhtevası normal Portland çimentosuna göre düşük olduğundan CaCO₃'ün çökmesi daha seyrek olur. Karbonatlaşma reaksiyonunun bir sonucu olarak, CaCO₃ kristallerinin meydana geldiği bölgelerde porozite arttığından, CO₂'in betonun iç kısımlarına difüzyonu da mümkün olmaktadır. Bu nedenle, yüzeyde meydana gelen karbonatlaşma reaksiyonları daha çabuk bir şekilde iç kısımlara ilerlemektedir. Normal Portland çimentolu betonlar ise, alkalilerle aktive edilmiş cüruflu betonlara göre daha fazla Ca⁺² içeriğine sahip olduğundan, çimento hamuru CO₂ ile temas ettiği vakit, meydana gelen düşük çözünürlüğe sahip CaCO₃ kristalleri, boşluklarda çökmek suretiyle CO₂'in bağlayıcı madde hamuruna difüzyonunu azaltmakta ve iç kısımlara girmesini engelleyecek bir bariyer meydana getirmektedir. Bu yüzden, normal Portland çimentolu hamurlarda karbonatlaşma reaksiyonları daha yavaş ilerlemekte ve alkaliler ile aktive edilmiş cüruflu betonların karbonatlaşma hızları normal Portland çimentolu betonlarındakinden daha yüksek olmaktadır.

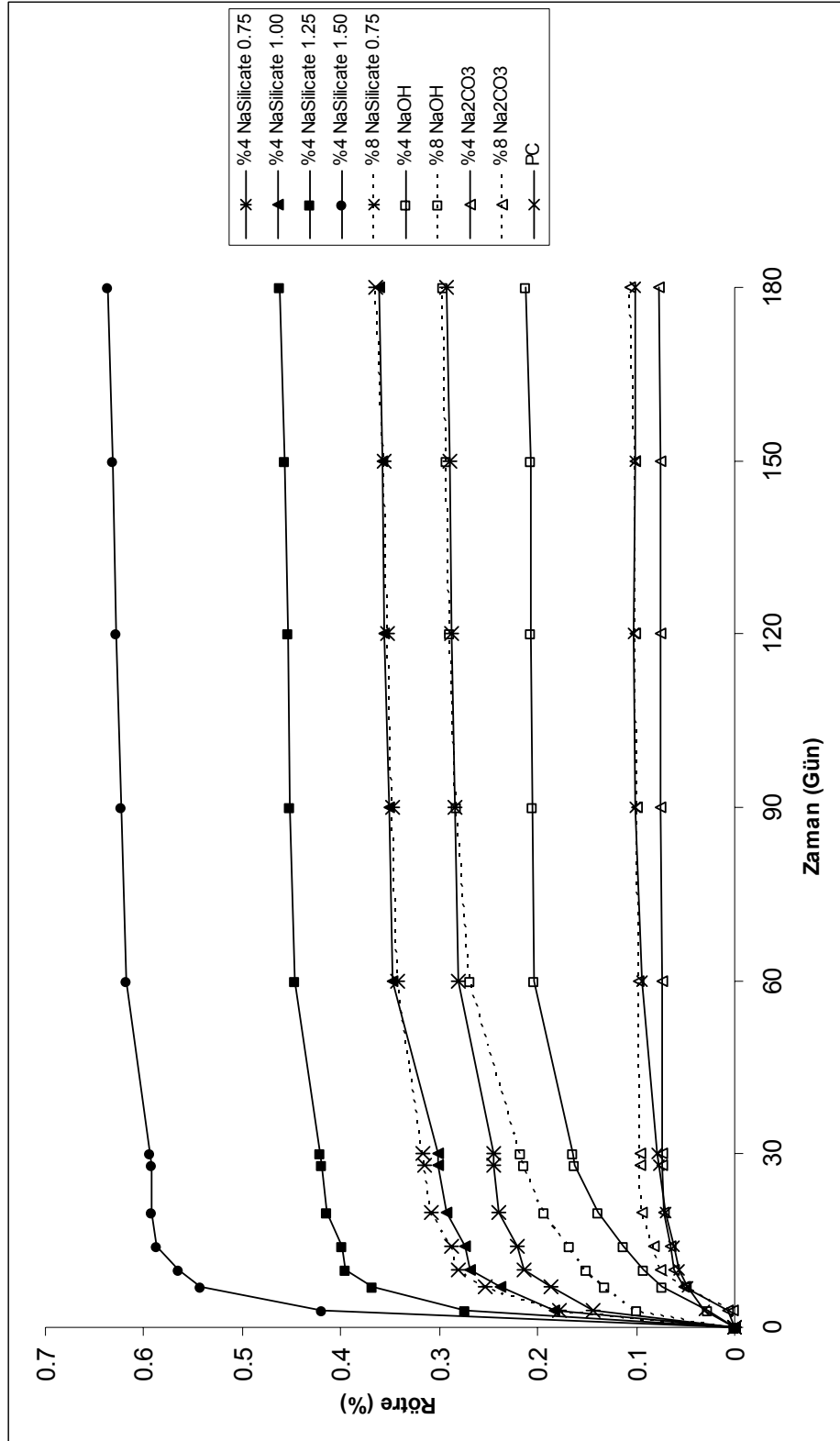
Normal Portland çimentosu kullanılarak üretilmiş kontrol harcının ve farklı alkali aktivatörler ile aktive edilmiş cüruf katkılı harçların 180 günlük zaman dilimine ait karbonatlaşma derinliklerindeki değişimler Şekil 4.39'da gösterilmektedir.



Şekil 4.39. %65 bağıl nemli ortamda kür edilen normal Portland çimentolu harcın ve farklı alkali aktivatörler ile aktive edilmiş cüruf lu harçların karbonatlaşma derinlikleri

4.4.4. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cüruf lu Harç Numunelerin Rötire Değerleri

Cüruf ikame oranı %100 olan ve hiç Portland çimentosu içermeyen 0.50 su/bağlayıcı oranında hazırlanmış karışımlardan elde edilen 25x25x285 mm ebadındaki prizmatik numuneler için 180. güne kadar rötire değerleri ölçülmüştür. Sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sıvı sodyum silikat için kullanılan aktivatör dozajları da, ağırlıkça cüruf miktarına göre, %4 ve %8 Na⁺ konsantrasyonu olarak seçilmiştir. Sıvı sodyum silikat ile aktivasyonda seçilen silikat modülleri, 0.75 ile 1.50 arasında değişirken, cürufun aktivasyonu sonucu elde edilen rötire değerleri, aynı su/bağlayıcı oranına sahip hiç cüruf katkısı içermeyen normal Portland çimentolu kontrol betonunkiyle kıyaslanmıştır. Farklı aktivatörle ile aktive edilmiş cüruf lu betonlar için elde edilen rötire değerleri bir grafik üzerinde Şekil 4.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Alkalilerle aktive edilmiş cürüflu harç numunelere ait rötore-zaman ilişkisi

Rötre, malzemelerin durabilitesini ve yapısal özelliklerini etkileyen önemli bir teknik parametredir. Şekil 4.40, normal Portland çimentosu ile kıyaslamalı olarak, NaOH, Na₂CO₃ ve sodyum silikat çözeltisi gibi üç farklı aktivatör ile aktive edilmiş cüruf katkılı betonlarda 6 aylık süre içerisinde gözlenen rötre ölçümlerini göstermektedir. Görüldüğü üzere harçların kuruma rötreleri, tüm aktivatörler için yükselen alkali konsantrasyonu ile birlikte artış göstermiştir. Na₂CO₃ ve NaOH ile aktive edilen cüruf lu betonların rötresi, normal Portland çimentolu betonun rötre değerinden daha yüksek olurken, en büyük rötre değerleri, sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruf katkılı harçlarda gözlenmiş ve bu numuneler üzerinde görülebilen rötre çatlakları ortaya çıkmıştır. Öte yandan, sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen harçlarda rötre değerleri, yükselen silikat modülüyle birlikte artış göstermektedir. Elde edilen sonuçlar önceki araştırmacılar tarafından literatürde de belirtilmiş olup, Krizan ve Zivanovic (2002), yükselen aktivatör dozajında olduğu gibi, artan silikat modülünün de alkaliler ile aktive edilmiş cüruf lu betonların kuruma rötresini arttırdığını ve elde edilen rötre değerlerinin, normal Portland çimentolu kontrol karışımlarına göre oldukça yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Boşluk büyüklükleri uluslararası kimya birliği standartlarına göre Çizelge 4.43'te görüldüğü gibi sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 4.43. Uluslararası kimya birliğine göre boşluk büyüklüğü sınıflaması

Boşluk Tipi	Yarıçap (nm)
Mikro büyüklükteki boşluklar	< 1.25
Orta büyüklükteki boşluklar	1.25 – 25
Makro büyüklükteki boşluklar	25 – 5000
Sürüklenmiş hava boşlukları, hapsolmuş hava boşlukları	5000 – 50000

Mikro boşluklar, C-S-H jel partiküllerinin arasında yer alan boşluklardır. Kapiler boşluklar ise, hem orta hem de büyük (makro) ölçekli boşlukları kapsamakta olup, çimento taneciklerinin arasında bulunan su dolu boşluklardır. Pratik şartlar altında kuruma rötresi, orta ölçekli boşluklarda meydana gelen su kaybına ve aynı

zamanda, suyun, orta ölçekli boşluklardan nasıl kolay bir şekilde kaybolabileceğini belirleyen makro boşlukların büyüklüğüne bağlı olmaktadır.

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 cürufli betonlarda bulunan orta büyüklükteki boşlukların normal Portland çimentolu betonlara göre daha fazla olmasından ileri geldiğini belirtmişlerdir. Alkalilerle aktive edilmiş cürufli betonların kuruma esnasındaki nem ve ağırlık kayıpları, normal Portland çimentolu betonlara göre daha az olmasına rağmen, rötire birim şekil değiştirmelerinin büyüklüğü daha fazladır. Ayrıca, menüsküs (su ve hava arasındaki ara yüzey) bölgesinde bulunan boşluk yarıçaplarının daha küçük olmasından dolayı, kuruma esnasında ortaya çıkan kapiler çekme kuvvetleri, alkalilerle aktive edilen cürufli betonların rötresi için çok önemli bir faktör olmaktadır. Bu yüzden, alkalilerle aktive edilmiş cürufli betonlarda ortaya çıkan yüksek kuruma rötresinin mekanizması, betondan kaybolan su miktarı ile tam olarak ilişkili değildir. Daha önce yapılan araştırmalarda, boşluk çapı dağılımının ve C-S-H jeli karakteristiklerinin kuruma rötresinin büyüklüğü üzerinde önemli bir etkisi olduğu bildirilmiştir (Wittmann, 1982; Young, 1988; Collins ve Sanjayan, 2000).

Portland çimentosu/cüruf sistemlerinin boşluk çapı dağılımı, artan cüruf miktarı ile birlikte gittikçe daha ince olmaktadır. Alkalilerle aktive edilmiş cürufli sistemlerde ise, orta ölçekli bölgede bulunan boşlukların oranı, Portland çimentosundan daha yüksek olmasına rağmen, kapiler bölge içerisindeki boşlukların sayısı Portland çimentosundan daha düşüktür. Alkalilerle aktive edilmiş cürufli betonlar, Portland çimentolarına kıyasla, makro ölçekli bölgede çok daha az boşluğa sahip olmalarından dolayı, kuruma rötresi, orta ölçekli bölgede bulunan boşlukları daha çabuk etkilemektedir. Bu durum, alkalilerle aktive edilmiş cürufli betonlarda, kuruma rötresinin büyük değerler almasına karşın, kuruma esnasındaki nem ve ağırlık kayıplarının, normal Portland çimentolu betonlara göre daha az olmasını açıklamaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Yapılan Çalışmalar Sonucunda Elde Edilen Bulgular

5.1.1. Beton Karışımlar Üzerinde Saptanan Bulgular

1. Çimentonun belli oranlarda yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilmesinin sarsma tablası deneylerinde kullanılan akışkan miktarları da dikkate alındığında taze betondaki işlenebilirliği arttırmakta olduğu görülmüştür.
2. Karışım içerisinde bulunan en hafif malzemenin su olması sebebiyle, artan su/bağlayıcı oranıyla birlikte birim ağırlıklarda da bir azalma olduğu gözlenmiştir.
3. Cüruf katkılı betonların ilk zamanlardaki mukavemet gelişimleri yavaş olmakla birlikte, cüruf katkısının beton basınç dayanımına olumlu etkisi, ilerleyen yaşlarda daha da belirginleşmekte ve normal bakım koşullarında bu etki, 28. günden sonra kendini göstermektedir.
4. Yüksek fırın cüruflarından elde edilecek faydayı maksimum yapan uygun bir su/bağlayıcı oranı olabileceği gibi, herhangi bir karışım için aynı şekilde optimum cüruf ikame oranının da bulunabileceği tespit edilmiştir.
5. Su/bağlayıcı oranının ya da cüruf yer değişim oranının optimum değerden uzaklaşmasıyla cüruf katkısının olumlu etkisi ortadan kalkmaktadır.
6. Su/bağlayıcı oranının artmasıyla dayanımlarda oluşan düşüşlerin yüzdesi çimento dozajının artmasıyla daha da fazla olmaktadır. Bu nedenle, artan çimento dozajına bağlı olarak karışıma giren agrega miktarındaki düşüşün basınç mukavemetini etkilediği ve herhangi bir su/bağlayıcı oranı için maksimum dayanım veren optimum çimento dozajı olduğu düşünülmektedir.
7. Uygun oranda cüruf, hiperakışkanlaştırıcı ve düşük su/bağlayıcı oranıyla 90-100 MPa mertebesinde basınç dayanımlarının elde edilmesi mümkün görülmektedir.
8. Düşük su/bağlayıcı oranındaki betonlara kıyasla, yüksek su/bağlayıcı oranındaki betonların dayanımları, fazla miktardaki cüruf oranlarından

olumsuz etkilenmekte ve bu betonlar, düşük ikame oranlı betonların belirli bir gündeki dayanımına daha uzun sürede yaklaşabilmektedir.

9. Yüksek ikame yüzdelerine sahip cürufllu betonların dayanımları, artan su/bağlayıcı oranı ile birlikte şahitlerine kıyasla daha belirgin bir şekilde düşmektedir.
10. Yüksek fırın cürufu içeren betonların mukavemetlerinin, kontrol betonlarına kıyasla, kür şartlarına karşı daha hassas olduğu ve bu tip betonların daha iyi kür edilmeleri gerektiği kanaati oluşmuştur.
11. Cüruf oranının artmasıyla birlikte kür şartlarının cüruf üzerindeki etkisi daha da belirginleşmekte, ıslak kürdekilerle kıyaslandığında, kuru kür edilmiş numuneler kendi şahitlerine oranla daha fazla dayanım kaybı göstermektedir.
12. Kür şartları artan su/bağlayıcı oranı ile daha da belirginleşmekte, düşük su/bağlayıcı oranlı kuru kür edilmiş cürufllu numuneler ile kıyaslandıklarında, yüksek su/bağlayıcı oranına sahip kuru kür edilmiş cüruf katkılı numuneler kendi şahitlerine oranla daha fazla dayanım kaybı göstermektedir.
13. Harç ve beton numunelerin basınç dayanımları arasında oldukça kuvvetli bir ilişki ortaya çıkmış, artan dozajla beraber bu ilişki daha da kuvvetlenmiştir.
14. Harç numunelerin beton numunelere göre kür şartlarından daha fazla etkilendiği görülmüş, buna neden olarak, numune boyutlarının en etkin parametre olduğu bulgusuna varılmıştır.

5.1.2. Harç Karışımlar Üzerinde Saptanan Bulgular

1. Artan cüruf katkısı özellikle düşük su/bağlayıcı oranındaki harçlarda işlenebilirliği arttırarak ihtiyaç duyulan katkı dozajında bir miktar azalma sağlamaktadır.
2. Su/bağlayıcı oranının azalmasıyla birlikte eğilme ve basınç mukavemetlerinde artış, kılcal su emme, aşınma, karbonatlaşma, boşluk oranı ve su emme gibi durabilite özelliklerinde de iyileşmeler olduğu gözlenmiştir.

3. Su/bağlayıcı oranı yüksek olan cürufli harçların dayanım gelişimleri yavaş olduğundan bu harçlar, düşük su/bağlayıcı oranındaki cürufli harçlara göre ilerleyen yaşlarda kendini göstermektedir.
4. Artan su/bağlayıcı oranı, özellikle yüksek yer değişim oranlarına sahip cüruf katkılı harçların mukavemet gelişimlerini olumsuz yönde etkilemek suretiyle, mukavemetlerini şahitlerine oranla daha belirgin bir şekilde düşürmektedir.
5. Karışım içerisinde yer alan yüksek fırın cürufu miktarının artmasıyla birlikte kuru kür şartlarının etkisi daha da belirgin olmakta, bunun yanı sıra kuru kür şartları, yüksek oranda su/bağlayıcı miktarına sahip harçları daha fazla etkilemektedir.
6. Yetersiz kür şartlarının cüruf içeren numuneleri şahit numunelere göre daha fazla etkilediği görülmüştür. Islak kür edilmiş bütün harç numuneleri, kuru kür edilmiş harç numunelerine göre daha yüksek dayanım ve durabilite özellikleri sergilerken kuru kür edilmiş harçların mukavemet ve durabilite özelliklerinde azalmalar gözlenmiştir.
7. Harçların 28 günlük eğilme ve basınç mukavemetleri göz önüne alındığında, optimum su/bağlayıcı oranının 0.30, optimum cüruf ikame oranının ise %40-60 arasında yer aldığı gözlenmiştir.
8. Basınç ve eğilme mukavemetleri arasında kuvvetli bir ilişkinin bulunduğu, her iki kür durumu için de elde edilen korelasyon katsayılarının oldukça tatminkar olduğu görülmüştür.
9. Etkili bir kür uygulamak şartıyla, 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı oranlarında yapılacak %40 yer değişim oranındaki yüksek fırın cürufu ilavesinin aşınmaya karşı dirençte artış sağladığı gözlenmiştir.
10. Aşınma ve dayanımlar arasında kurulan ilişki neticesinde, Los Angeles aşınma deney aletinin harçların aşınma oranlarının bulunmasında kullanılabileceği yargısına varılmıştır.
11. Su/bağlayıcı oranı 0.30 olan harçlarda, yapılan %20 ve %40 cüruf ikamelerinin, 28. günden sonra karbonatlaşma değerlerinde şahitlerine oranla düşüşler meydana getirdiği görülmüştür. Öte yandan, 0.40 ve 0.50

- su/bağlayıcı oranlarına sahip harçların karbonatlaşma değerleri ise, tüm ikame oranları için şahitlerine göre daha fazla olmuştur.
12. Beton üretiminde kullanılacak çimentolarda C_2S ana bileşenlerinin, C_3S ana bileşenlerinden daha fazla olması, hidrasyon sonucunda daha az miktarda $Ca(OH)_2$ oluşmasına yol açmaktadır. Bu nedenle karbonatlaşma olayına maruz kalabilecek betonlar için C_2S oranı nispeten daha yüksek çimentolar kullanılması uygun olmaktadır. Öte yandan, düşük su/bağlayıcı oranında ve uygun dozajda olmak şartıyla, kimyasal reaksiyon gösterebilmek için çimentonun hidrasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksiti kullanmalarından dolayı, beton içerisinde yüksek fırın cürufu katkısının kullanılması karbonatlaşmayı azaltmada olumlu katkı sağlamaktadır.
 13. 0.30 gibi düşük su/bağlayıcı oranına sahip cüruf katkılı harçların, bütün yer değişim oranları için her iki kür durumunda da şahitlerine göre daha düşük su emme ve boşluk oranları sergilediği ve kür şartlarının düşük su/bağlayıcı oranına sahip cüruf katkılı harçları daha az etkilediği görülmüştür.
 14. Boşluk oranı ve basınç mukavemetleri arasında, boşluk oranı azaldıkça basınç mukavemetinin de arttığı şeklinde bir ilişki gözlenmiştir.
 15. Artan su/bağlayıcı oranına paralel olarak, kılcal su emme katsayılarında da bir artış olmakla birlikte, kuru kür edilen harçların kılcal su emme katsayıları, ıslak kürdekilere kıyasla oldukça fazla olmuştur. Su bağlayıcı oranı 0.30 olan %20 ve %40 cüruf katkılı numuneler, şahit numuneye göre her iki kür durumunda da düşük kılcal su emme katsayısı değerleri sergilemiştir.
 16. Su/bağlayıcı oranının yükselmesi ile rötre değerlerinde de bir artış meydana gelmiştir. Öte yandan, %20 ve %40 oranlarında cüruf katkısının rötre değerlerini normal Portland çimentolu karışıma göre fazla etkilemediği, ancak, çimentonun %60 ve %80 gibi yüksek ikame oranlarında cüruf ile yer değiştirilmesinin rötreyi genel olarak arttırıcı bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

5.1.3. Alkaliler ile Aktive Edilmiş Cürüflu Harç Karışımları Üzerinde Saptanan Bulgular

1. %100 oranında cüruf içeren karışımlara göre, Portland çimentosu/cüruf sistemlerinin aktivasyon karşısında gösterdiği düşük mukavemet, bu tarz bir bağlayıcı kullanımı için çok fazla cesaret verici olmamıştır. Bu nedenle, sadece cüruf içeren karışımların aktivasyonu üzerinde çalışılmasının daha uygun olacağı kanaati ortaya çıkmıştır.
2. Portland çimentosu/cüruf sistemlerinin aktivasyon karşısında gösterdiği düşük mukavemet, meydana getirdiği daha boşluklu bir yapı nedeniyle önemli miktarda kalsiyum hidroksitin ve Na içeren C-S-H jellerinin (N-C-S-H) gelişmesine neden olan alkali aktivatörlerin, çimento hidratasyonu üzerindeki olumsuz etkisinden ileri geldiği düşünülmektedir.
3. Alkaliler ile aktive edilmiş harç numunelerinde işlenebilirliğin, belirli bir Na^+ konsantrasyonu için artan M_s (silikat modülü) ile beraber güçleştiği ve yapışkanlığın arttığı görülmüştür. Sabit bir silikat modülü için artan Na^+ konsantrasyonunda da benzer bir durumun söz konusu olduğu gözlenmiştir.
4. Elde edilen mekanik mukavemet değerlerine göre kullanılan aktivatörleri, büyükten küçüğe doğru; sodyum silikat çözeltisi $> \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaOH}$ şeklinde sıralamak mümkündür.
5. Islak kür eksikliği, alkaliler ile aktive edilmiş cürüflu betonlardaki mukavemet gelişimini yetersiz kür şartları nedeniyle önemli ölçüde azalttığından, yapılarda kullanılması durumunda bu betonların çok iyi kür edilmesi zorunlu olmaktadır.
6. En yüksek karbonatlaşma değerleri Na_2CO_3 ile aktive edilmiş cürüflu harçlardan elde edilmiştir. Öte yandan, artan Na^+ dozajı ile birlikte karbonatlaşma değerlerinde bir azalma olduğu ve sodyum silikat çözeltisiyle aktive edilen harçlarda da yükselen silikat modülü (M_s) ile benzer bir durumun ortaya çıktığı görülmüştür.
7. Alkaliler ile aktive edilmiş cürüflu harçlar, normal Portland çimentosu ile kıyaslandığında, büyük rötre değerleri sergilemiş, en büyük rötre değerleri,

sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruf katkılı harçlarda gözlenmiştir.

8. Harçların kuruma rötreleri, tüm aktivatörler için yükselen alkali konsantrasyonu ile birlikte artış göstermiştir. Sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen harçlarda, yükselen silikat modülüyle birlikte rötrenin de artmakta olduğu görülmüştür.
9. Alkalilerle aktive edilmiş cüruf katkılı harç numunelerinin içerisinde bulunduğu kuru kür ortamı, rötre deformasyonlarının meydana getirdiği çatlaklıkların ilerlemesinde etkin bir rol oynamaktadır.
10. Aktivatör konsantrasyonu arttığında, mekanik mukavemet de belirli bir ölçüde artmaktadır. Düşük konsantrasyon değerleri aktivasyonu geciktirirken, yüksek değerler de çiçeklenme ve gevreklik problemlerini ortaya çıkarmaktadır. İlaveten, yüksek aktivatör konsantrasyonları, ekonomik açıdan tavsiye edilmemektedir.
11. Genel olarak tüm konsantrasyon seviyeleri için maksimum mukavemet, 0.75 ve 1.00 gibi düşük modüllere sahip sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen cürufllu harçlardan elde edilmiştir. Ancak, mukavemet ve ekonomi gibi sebepler göz önüne alındığında, alkaliler ile aktive edilmiş cürufllu betonlarda kullanım için, $M_s=0.75$ ve %4 Na miktarındaki sodyum silikat çözeltisi önerilmektedir.

5.2. Öneriler

1. Türkiye’de üretilen granüle yüksek fırın cüruflarının bir bölümü cürufllu çimentoların üretiminde kullanılırken, cürufun ayrıca öğütülerek beton yapımında mineral katkı olarak kullanılma yöntemi henüz uygulanmamaktadır. Granüle yüksek fırın cüruflarının ayrıca öğütülerek beton yapımında mineral katkı maddesi olarak kullanılmasının, birçok yararlar sağlayacağına inanıldığından, cürufun bu tarz kullanımına yönelik tanıtıcı ve bilgilendirici uygulamalar desteklenerek, pratik alanda

kullanılması teşvik edilmeli ve ülke kaynaklarının maksimum verimle değerlendirilmesine çalışılmalıdır.

2. Mukavemet ve durabilite özellikleri açısından çimentonun ortalama olarak %50 oranında yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilmesi mümkün görülmektedir. Cürufun beton içerisinde mineral katkı malzemesi olarak kullanılmasıyla, çimento üretiminde gerekli olan ve miktarları kısıtlı doğal kaynakların kullanımı azaltılarak ekonomi sağlanmakta, öte yandan, depolamanın beraberinde getireceği çevresel sorunlar da ortadan kaldırılmış olmaktadır.
3. Bu çalışma kapsamında yürütülemeyen ve cürufun beton içerisinde mineral katkı malzemesi olarak kullanılması durumunda, yapı güvenliği açısından önem arz edebilecek diğer bazı durabilite özelliklerinin de ayrıntılı bir şekilde incelenmesi yararlı olacaktır.
4. Yüksek fırın cürufu içeren betonlar, kür şartlarına karşı daha hassas olduğu için bu konuda dikkatli olunmalı, uzun süreli ve etkili küre tabi tutulmalıdır.
5. Alkaliler ile aktive edilmiş cürufu karışımlar üzerinde daha kapsamlı araştırmalar yapılmalı, kimyasal aktivatörlerin kullanımına ilişkin maliyet-verim profili çıkartılarak, en uygun aktivatör dozajına karar verilmelidir.
6. Normal Portland çimentoları ile kıyaslandıklarında, rötre birim şekil değiştirmelerinin büyüklüğünün daha fazla olmasından dolayı, alkalilerle aktive edilmiş cürufu betonların rötresini azaltmada yararlı olabilecek sıcak kür uygulamalarının ya da rötre azaltıcı kimyasal katkıların kullanılabilirliği ve etkinliği bu tip betonlar için araştırılmalıdır.
7. Daha düşük su/bağlayıcı oranlarının kullanılması durumunda, gereksinim duyulacak akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların alkaliler ile aktive edilmiş cürufu karışımların özellikleri üzerindeki etkilerine ve elde edilecek dayanımlara yönelik başka bir çalışma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- ACI 308-92, 1994. Standard Practice for Curing Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Part 2, pp. 308-1 to 11.
- ALDEA, C. M., YOUNG, F., WANG, K., SHAH, S. P., 2000. Effects of Curing Conditions on Properties of Concrete Using Slag Replacement. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 465–472.
- AL-KAISI, A. F., 1989. Early Age Strength and Creep of Slag Cement Concretes. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Leeds.
- ALMEIDA, I. R., 1992. Carbonation of High Strength Concrete with Chemical and Mineral Admixtures. 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, pp. 735–748.
- ALSHAMSI, A. M., 1997. Mikrosilica and Ground Granulated Blast Furnace Slag Effects on Hydration Temperature. Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 12, pp. 1851–1859.
- 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. Annual Book 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 by Reaction with Alkali. Annual Book of ASTM Standards.

- ATİŞ, C. D., ÇELİK, Ö. N. 2002. Relation between Abrasion Resistance and Flexural Strength of High Volume Fly Ash Concrete. *Materials and Structures-RILEM*, 35 (248) pp. 257–260
- ATİŞ, C. D., ÖZCAN, F., KARAHAN, O., BİLİM, C., SEVİM, U. K., DEMİR, A., 2003. Silis Dumanı Kullanımının Beton Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Sayı 426, s. 121–124, Ankara.
- ATİŞ, C. D., ÖZCAN, F., KILIÇ, A., KARAHAN, O., BİLİM, C., SEVERCAN, M. H., 2005. Influence of Dry and Wet Curing Conditions on Compressive Strength of Silica Fume Concrete. *Building and Environment*, Vol. 40, pp. 1678–1683.
- BABU, K. D., KUMAR, V. S. R., 2000. Efficiency of Ground Granulated Blast Furnace Slag in Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1031–1036.
- BAKHAREV, T., SANJAYAN, J. G., CHENG, Y. B., 1999. Alkali Activation of Australian Slag Cements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 113–120.
- BAKHAREV, T., SANJAYAN, J. G., CHENG, Y. B., 1999. Effect of Elevated Temperature Curing on Properties of Alkali-Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1619–1625.
- BAKHAREV, T., SANJAYAN, J. G., CHENG, Y. B., 2000. Effect of Admixtures on Properties of Alkali-Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1367–1374.
- BAKHAREV, T., SANJAYAN, J. G., CHENG, Y. B., 2001. Resistance of Alkali-Activated Slag Concrete to Alkali-Aggregate Reaction. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 331–334.
- BAKHAREV, T., SANJAYAN, J. G., CHENG, Y. B., 2001. Resistance of Alkali-Activated Slag Concrete to Carbonation. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1277–1283.

- BAKHAREV, T., SANJAYAN, J. G., CHENG, Y. B., 2002. Sulfate Attack on Alkali-Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 211–216.
- BAKHAREV, T., SANJAYAN, J. G., 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 Melzemesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No.207, c.2, 221s, İzmir.
- 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, pp. 434–440.
- BERKTAY, İ., 1991. Genelde Yüksek Dayanımlı Beton, 2. Ulusal Beton Kongresi Yüksek Dayanımlı Beton Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s. 1-14.
- BIJEN, J., 1996. Benefits of Slag and Fly Ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 5, pp. 309–314.
- BROOKS, J. J., AL-KAISI, A. F., 1990. Early Strength Development of Portland and Slag Cement Concretes Cured at Elevated Temperatures. *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 5, pp. 503–507.
- BROOKS, J. J., WAINWRIGHT, P. J., BOUKENDAKJI, M., 1992. Influence of Slag Type and Replacement Level on Strength, Elasticity, Shrinkage and Creep of Concrete. *Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., İstanbul, pp. 1325-1341.
- BROOKS, J. J., JOHARI, M. A. M., MAZLOOM, M., 2000. Effect of Admixtures on The Setting Times of High-Strength Concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, pp. 293–301.
- BROUGH, A. R., HOLLOWAY, M., SYKES, J., ATKINSON, A., 2000. Sodium Silicate-Based, Alkali-Activated Slag Mortars Part II. The Retarding Effect of

- Additions of Sodium Chloride or Malic Acid. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1375–1379.
- BROUGH, A. R., ATKINSON, A., 2002. Sodium Silicate-Based, Alkali-Activated Slag Mortars Part I. Strength, Hydration and Microstructure. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 865–879.
- CHENG, A., HUANG, R., WU, J. K., CHEN, C. H., 2005. Influence of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Durability and Corrosion Behavior of Reinforced Concrete. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 93, pp. 404–411.
- CHERN, J. C., CHAN, Y. W., 1989. Deformations of Concretes Made with Blast-Furnace Slag Cement and Ordinary Portland Cement. *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 4, pp. 372–382.
- 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, pp. 655–664.
- COLLINS, F., SANJAYAN, J. G., 1999. Workability and Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 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, pp. 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, pp. 345–352.

- ÇEVİK, M., 1993. Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül den Taşıyıcı Hafif Agrega Üretimi. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, s. 235–242.
- DEJA, J., 2003. Freezing and De-icing Salt Resistance of Blast Furnace Slag Concretes. Cement and Concrete Composites, Vol. 25, pp. 357–361.
- DHIR, R. K., EL-MOHR, M. A. K., DYER, T. D., 1996. Chloride Binding in GGBS Concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 1767–1773.
- DIAS, W. P. S., 2000. Reduction of Concrete Sorptivity with Age Through Carbonation. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1255–1261.
- DOĞULU, S., 1998. Effect of Fineness of Ground Granulated Blast-Furnace Slags on Their Cementitious Properties. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- DONGXU, L., JINLIN, S., YIMIN, C., LIN, C., XUEQUAN, W., 2000. Study of Properties on Fly Ash-Slag Complex Cement. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1381–1387.
- 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, s. 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, s. 1–13.
- 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, 741s.

- EREN, Ö., BROOKS, J. J., ÇELİK, T., 1995. Setting Times of Fly Ash and Slag-Cement Concretes as Affected by Curing Temperature. *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 15, No. 1, pp. 11–17.
- FERNANDEZ, L., MALHOTRA, V. M., 1990. Mechanical Properties, Abrasion Resistance and Chloride Permeability of Concrete Incorporating Granulated Blast-Furnace Slag. *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 12, No. 2, pp. 87–100.
- FREARSON, J. P. H., HIGGINS, D. D., 1992. Sulfate Resistance of Mortars Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag with Variable Alumina Content. *Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., İstanbul, pp. 1525–1542.
- FUKUDOME, K., MIYANO, K., TANIGUCHI, H., KITA, T., 1992. Resistance to Freezing and Thawing and Chloride Diffusion of Anti-Washout Underwater Concrete Containing Blast-Furnace Slag. *Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., İstanbul, pp. 1565-1582.
- GEISELER, J., KOLLO, H., LANG, E., 1995. Influence of Blast-Furnace Cements on Durability of Concrete Structures. *ACI Material Journal*, Vol. 92, No. 3, pp. 252–257.
- GÜLLÜ, H., 1996. Properties of Fresh Concrete Containing Fly Ash and Blast-Furnace Slag. *Yüksek Lisans Tezi*, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.
- GÜNER, A., 1993. Günümüzde Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründe Kullanımı. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, s. 215–222.

- GÜNEYİSİ, E., ÖZTURAN, T., GESOĞLU, M., 2003. Çimento Tipinin Havada Kür Edilen Betonda Basınç Dayanımı ve Karbonatlaşmaya Etkileri. Hazır Beton, THBB, Sayı 58, s. 68-73.
- HINCZAK, I., CAO, H. T., 1992. Long Term Properties of Slag Cement Mortars and Concretes in Marine and Sulphate Environments. 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, pp. 709–720.
- HOGAN, F. J., MEUSEL, J. W., 1981. Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast Furnace Slag. Cement Concrete Aggregates, Vol. 3, No. 1, pp. 40–52.
- HOOTON, R. D., EMERY, J. J., 1990. Sulphate Resistance of a Canadian Slag Cement. ACI Material Journal, Vol. 87, No. 6, pp. 547–555.
- JIANYONG, L., PEI, T., 1997. Effect of Slag and Silica Fume on Mechanical Properties of High Strength Concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 6, pp. 833–837.
- JIANYONG, L., YAN, Y., 2001. A Study on Creep and Drying Shrinkage of High Performance Concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 8, pp. 1203-1206.
- JIMENEZ, A. F., PALOMO, J. G., PUERTAS, F., 1999. Alkali-Activated Slag Mortars Mechanical Strength Behaviour. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1313–1321.
- JIMENEZ, A. F., PUERTAS, F., 2001. Setting of Alkali-Activated Slag Cement. Influence of Activator Nature. Advances in Cement Research, Vol. 13, No. 3, pp. 115–121.
- JONES, M. R., DHIR, R. K., MAGEE, B. J., 1997. Concrete Containing Ternary Blended Binders: Resistance to Chloride Ingress and Carbonation. Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 6, pp. 825–831.

- 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, pp. 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, pp. 615–625.
- KWON, Y., 2005. A Study on The Alkali-Aggregate Reaction in High-Strength Concrete with Particular Respect to The Ground Granulated Blast-Furnace Slag Effect. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1305–1313.
- LI, G., ZHAO, X., 2003. Properties of Concrete Incorporating Fly Ash and Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, pp. 293–299.
- LUO, R., CAI, Y., WANG, C., HUANG, X., 2003. Study of Chloride Binding and Diffusion in Ground Granulated Blast Furnace Slag Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1–7.
- LURA, P., BREUGEL, K. V., MARUYAMA, I., 2001. Effect of Curing Temperature and Type of Cement on Early-Age Shrinkage of High-Performance Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1867–1872.
- MEHTA, P. K., 1989. Pozzolanic and Cementitious By Products in Concrete-Another Look. *Third International Conference on The Use of Fly Ash, Silica Fume Slag and Other Mineral By-Products in Concrete*, Trondheim, Norway. ACI Special Publication, SP-114, pp. 1–43.
- NAKAMURA, N., SAKAI, M., SWAMY, R. N., 1992. Effect of Slag Fineness on the Development of Concrete Strength and Microstructure. *Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., İstanbul, pp. 1343-1366.

- NAWY, E. G., 2001. Fundamentals of High-Performance Concrete. John Wiley&Sons Inc, USA.
- NEVILLE, A. M., 1981. Properties of Concrete, Longman Scientific & Technical, England.
- NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J., 1993. Concrete Technology. Longman Scientific and Technical, USA.
- NEWMAN, J., CHOO, B. S., 2003. Advanced Concrete Technology. Constituent Materials, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- OHAMA, Y., MADEJ, J., DEMURA, K., 1995. Efficiency of Finely Ground Blast Furnace Slags in High-Strength Mortars. Milwaukee Conference.
- OLORUNSOGO, F. T., 1998. Particle Size Distribution of Ground Granulated Blast Furnace Slag and Bleeding Characteristics of Slag Cement Mortars. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 6, pp. 907–919.
- ONAT, O. B., 1998. Türkiye’de Üretilen Yüksek Fırın Cürufalarının Çimento Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- OSBORNE, G. J., 1992. The Performance of Portland and Blast Furnace Slag Cement Concretes in Marine Environments. Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., İstanbul, pp. 1303-1323.
- OSBORNE, G. J., 1999. Durability of Portland Blast-Furnace Slag Cement Concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 21, pp. 11–21.
- OTSUKI, N., NAGATAKI, S., NAKASHITA, K., 1992. Effect of Blast Furnace Slag, Silica Fume and Fly Ash on The Properties of Mortar Against Chloride Attack. 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, pp. 1055–1063.

- OYMAEL, S., YEĞİNOBALI, A., 1996. Bitümlü Şist Külü Katkısının Betonda Aşınma Dayanımına Etkisi. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s. 359–367.
- ÖNER, M., 2001. Yüksek Fırın Cürufalarının Çimento Üretiminde Kullanımında Öğütmeye İlgili Parametrelerin Etkilerinin Belirlenmesi. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, Ankara, Sayı 23, s. 61–69.
- ÖZCAN, F., 2005. Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri ve Hızlandırılmış Kür ile Dayanım Tahmini. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- ÖZER, B., 2000. Doğal Puzolanlarla Üretilen Betonlarda Kür Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- ÖZER, B., ÖZKUL, H., 2004. The Influence of Initial Water Curing on The Strength Development of Ordinary Portland and Pozzolanic Cement Concretes. Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 13–18.
- ÖZKUL, H., YILDIRIM, H., 1996. Kimyasal Katkılarının Uzun Süreli Davranışları. 4. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, s. 133-148.
- ÖZTURAN, T., 1991. Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği. 2. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, s. 280–293.
- 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, pp. 1358–1367.
- PERSSON, B., 2001. A Comparison Between Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete and the Corresponding Properties of Normal Concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 2, pp. 193-198.
- POSTACIOĞLU, B. 1986. Beton. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, c.1, 170s, İstanbul.
- POSTACIOĞLU, B. 1987. Beton. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, c.2, 223s, İstanbul.

- PRATAS, J. D., 1978. Early Age Strength Development of Slag Cement Concretes. MSc. Dissertation, University of Leeds.
- RAMEZANIANPOUR, A. A., MALHOTRA, V. M., 1995. Effect of Curing on The Compressive Strength, Resistance to Chloride-ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume. Cement and Concrete Composites, Vol. 17, pp. 125–133.
- REEVES, C. M., 1986. The Use of Ground Granulated Blast Furnace Slag to Produce Durable Concrete. Improvement of Concrete Durability, Thomas Telford Limited, pp. 59–95.
- 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, pp. 10–18.
- REGOURD, M., 1986. Slags and Slag Cements. Cement Replacement Materials, R.N. Swamy, Surrey University Pres, s. 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, pp. 445–457.
- ROY, D. M., JIANG, W., SILSBEE, M. R., 2000. Chloride Diffusion in Ordinary, Blended and Alkali-Activated Cement Pastes and Its Relation to Other Properties. Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1879–1884.
- SAKAI, K., WATANABE, H., SUZUKI, M., HAMAZAKI, K., 1992. Properties of Granulated Blast-Furnace Slag Cement Concrete. Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., İstanbul, pp. 1367-1383.
- SEVİM, U. K., 2003. Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanılabilirliğinin Çimento Hamuru ve Harçların Üzerinde Yapılan Deneylerle Araştırılması. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- SHAH, S. P., AHMAD, S. H., 1994. High Performance Concretes and Applications. ISBN 0-340-58922-1, London, 415s.

- SHI, C., DAY, R. L., 1995. A Calorimetric Study of Early Hydration of Alkali-Slag Cements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 6, pp. 1333–1346.
- SHI, C., DAY, R. L., 1996. Some Factors Affecting Early Hydration of Alkali-Slag Cements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 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, pp. 189–196.
- SIVASUNDARAM, V., MALHOTRA, V. M., 1992. Properties of Concrete Incorporating Low Quantity of Cement and High Volumes of Ground Granulated Slag. *ACI Material Journal*, Vol. 89, No. 6, pp. 554–563.
- SOROKA, I., 1993. Concrete in Hot Environments. National Building Research Institute, Faculty of Civil Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, 247s.
- SWAMY, R. N., 2001. Beton Teknolojisinde Tümsel Tasarım: İnşaatlarda Dayanıklılığın ve Sürdürülebilirliğin Tek Yolu. *Çimento ve Beton Dünyası*, Yıl 6, Sayı 34, s. 31–43.
- ŞİMŞEK, O., 2004. Beton ve Beton Teknolojisi. Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A.Ş., ISBN 975-347-809-7, Ankara, 247s.
- TAN, K., PU, X., 1998. Strengthening Effects of Finely Ground Fly Ash, Granulated Blast Furnace Slag and Their Combination. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 12, pp. 1819–1825.
- TAŞDEMİR, C., 1998. Mineral Katkıların ve Kür Koşullarının Betonun Kılcal Geçirirliğine Etkileri. Beton-Çimento ve Boya Semineri, DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Ankara, s. 47–56.
- TAŞDEMİR, C., 2003. Combined Effects of Mineral Admixtures and Curing Conditions on The Sorptivity Coefficient of Concrete. *Cement and Concrete Research* (2371) pp. 1–6.
- TAŞDEMİR, M. A., TAŞDEMİR, C., ÖZBEK, E., ALTAY, B., 2000. ÖYFC İnceliğinin Betonun Özelliklerine ve Mikroyapısına Etkisi. *Çimento ve Beton Dünyası*, Yıl 4, Sayı 24, s. 19–36.

- TOKYAY, M., 2003. Cürüflar ve Cürüflu Çimentolar. Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu, TÇMB, Ankara, 47s.
- TOMISAWA T., CHIKADA, T., NAGAO, Y., 1992. Properties of Super Low Heat Cement Incorporating Large Amounts of Ground Granulated Blast Furnace Slag of High Fineness. Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132, Vol. 2, Editor V. M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., İstanbul, pp. 1385–1399.
- TS 20, 1992. Çimento-Yüksek Fırın Cürüflu Çimentolar. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 706, 1980. Beton Agregaları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 802, 1985. Beton Karışım Hesapları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3453, 1981. Beton Elemanlarda Büzülme Oranı (Rötire) Tayini Metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3526, 1980. Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3624, 1981. Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 4045, 1984. Yapı Malzemelerinde Kapiler Su Emme 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. Kagit Harcı Deney Metodları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 1015-11, 2000. Kagit Harcı Deney Metodları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2, 2002. Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-5, 2001. Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 5: Yayılma Tablası Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-2, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2003. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 1033–1043.
- WANG, S. D., PU, X. C., SCRIVENER, 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, pp. 93–102.

- YEAU, K. Y., KIM, E. K., 2005. An Experimental Study on Corrosion Resistance of Concrete with Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1391–1399.
- ZHANG, X., WU, K., YAN, A., 2004. Carbonation Property of Hardened Binder Pastes Containing Super-Pulverized Blast-Furnace Slag. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 371–374.
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Oğuzeli’nde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kilis’te tamamladı. 1995 yılında girdiği Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi’nden, 1999 yılı Haziran döneminde İnşaat Mühendisi unvanıyla mezun oldu. Aynı yıl, Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Yüksek Lisans programına başladı ve Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı. Aralık 2001 tarihinde Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Eylül 2002 tarihinde Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Anabilim dalında Doktora öğrenimine başladı.