

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ANTALYA ETİBANK ELEKTROMETALURJİ İŞLETMESİ
SİLİS DUMANLARININ ÇİMENTO ve BETONDA KATKI MADDESİ
OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Cevdet Emin EKİNCİ

DOKTORA TEZİ

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ
1995

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ANTALYA ETİBANK ELEKTROMETALURJİ İŞLETMESİ
SİLİS DUMANLARININ ÇİMENTO ve BETONDA KATKI MADDESİ
OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Cevdet Emin EKİNCİ

DOKTORA TEZİ

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

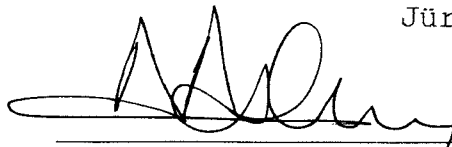
Bu Tez, 20.11.1995 Tarihinde Aşağıda Belirtilen Jüri
Tarafından Oybirliği İle Başarılı Olarak
Değerlendirilmiştir.



Prof.M.Asım YEĞİNOBALI
Jüri Üyesi



Doç.Dr.Mustafa TOKYAY
Jüri Üyesi



Doç.Dr.Abdussamet ARSLAN
Jüri Üyesi

ÖZET

Doktora Tezi

ANTALYA ETİBANK ELEKTROMETALURJİ İŞLETMESİ
SİLİS DUMANLARININ ÇİMENTO ve BETONDA KATKI MADDESİ
OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Cevdet Emin EKİNCİ

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

1995, Sayfa:195

Bu araştırmada, Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Tesisleri'nde tutulan silis dumanlarının çimento ve betona olan etkileri incelendi. Benzer şekilde, çimento hamuru, harç ve değişik oranlarda çimento ile silis dumanı yer değiştirilerek hazırlanan betonun bazı özellikleri kontrol betonu ile karşılaştırıldı.

Sonuçlara göre, silis dumanı ilave edilmesiyle çimentonun dayanımı artıyor ve harcın hazırlanış süresini kısaltıyor. Silis dumanı katkı ile birlikte normal su ihtiyacını da artırmaktadır. Bu olay, süper akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanımını gerektirmektedir. Silis dumanı eklenmesi harçların basınç ve eğilme dayanımı ile sülfata karşı direncini artırıyor. İçinde silis dumanı olan betonlarda aşınma kaybı, kuruma rötresi, şişme düşerken, basınç, çarpma, donma-çözülme dayanımı ve sülfat direnci kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında gözle görülür şekilde gelişmektedir. FeSi dumanının pozitif etkileri daha belirgindir. Optimum çimento ile yer değiştireceği oran yaklaşık %10 olarak bulunmuştur. Ayrıca bu çalışma, çimento-silis dumanı karışım ve hamurları üzerinde yapılan x-ışını difraktogramı, differansiyel termal analiz ve termogravimetrik analiz incelemesini de kapsamaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Çimento (portland), harç, silis dumanı, basınç dayanımı, çekme dayanımı, donma-çözülme dayanımı, sülfat direnci, çarpma dayanımı, aşınma kaybı, kuruma rötresi, x-ışını difraksiyonu, differansiyel termal analiz, termogravimetrik analiz.

SUMMARY

PhD Thesis

POTENTIAL USES OF SILICA FUMES FROM
ANTALYA ETİBANK ELEKTROMETALURJİ INDUSTRY
AS ADMIXTURES IN CEMENT AND CONCRETE

Cevdet Emin EKİNCİ

Fırat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Construction Education

1995, Page:195

This study has been aimed to investigate the effects of silica fumes collected to Antalya Etibank Elektrometalurji Industry plant on cement and concrete properties when used as admixtures. Accordingly, some properties of the cement, paste, mortar and concrete mixtures which were prepared by partial replacement of cement by silica fumes (FeSi and SiFeCr) at different levels, were studied and compared with properties of control mixtures containing no silica fume.

According to the results, addition of silica fume improved the soundness of cements and prolonged the setting times. Normal consistency water requirements were increased in proportion with silica fume content. This necessitated the use of superplasticizing admixtures. Silica fume addition improved the compressive and flexural strengths and sulfate resistance of mortars. In silica fume concretes, abrasion loss, drying shrinkage and swelling were reduced while the compressive strength, impact strength, freeze-thaw resistance and sulfate resistance were improved considerably as compared with control concrete mixtures. The positive effects of silica fume addition were more significant with FeSi fume. Optimum cement replacement level was found to be around 10%. The study also included x-ray diffraction, differential thermal analysis, thermogravimetric analysis studied on cement-silica fume mixtures and pastes.

KEY WORDS: Cement (portland), concrete, mortar, silica fume, compressive strength, flexural strength, freeze-thawing resistance, sulfate resistance, impact resistance, abrasion loss, drying shrinkage, x-ray diffraction, differential thermal analysis, thermogravimetric analysis.

ÖNSÖZ

Ülkemizdeki çeşitli sektörlerin, üretim artışı maddelerin inşaat sektöründe değerlendirilmesine yönelik araştırmalar; uçucu kül, yüksek fırın curufu konularında yoğunlaşmıştır. Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi silis dumanları (FeSi ve SiFeCr), silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde ortaya çıkan ve özel filtrelerle tutulan bir endüstriyel artıktır. Bu silis dumanlarının inşaat sektöründe değerlendirilmesine yönelik araştırmalar çok az olup, hemen hepsi yüzeysel olarak incelenmiştir.

Bu araştırma ile elde edilen verilerin özellikle silis dumanlarının, beton üretiminde kullanımını güncelleştirip, yüksek nitelikli betonların üretilmesi ve düşük mukavemetli betonların niteliklerinin iyileştirilmesi konularında ortaya çıkan sorunlar üzerinde düşünme, tartışma ve yeni araştırmalara ışık tutacağı ümit edilmektedir. Araştırmanın ülkemiz inşaat sektörüne yararlı olmasını dilerim.

Araştırmanın yürütülmesinde bana ışık tutan, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. M.Asım YEĞİNOBALI'ya, Sayın Prof.Dr. Şeref KUNÇ'a, Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Elazığ Altınova Çimento Fabrikası, Elazığ Keban Holding A.Ş. Elbeton Prefabrike Yapı Elemanları Fabrikası, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi ve Metal Eğitimi Bölümü, Elazığ Meslek Yüksek Okulu Makine ve İnşaat Programı yönetici, öğretim elemanları ve laboratuvar personeli ile Eşim Binnaz EKİNCİ'ye, Sayın Öğr.Gör. Sabit OYMAEL'e, Sayın Yapı Teknik Öğretmeni Celal TAŞDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TÜRKÇE ÖZET	i
SUMMARY	ii
ÖNSÖZ	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xi
FOTOĞRAFLAR LİSTESİ	xiii
SİMGELER LİSTESİ	xvi

1. GİRİŞ

1.1. Amaç	3
1.2. Yöntem	3
1.2.1. Evren ve örneklem	4
1.2.2. Veri toplama yöntemi	4

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Giriş	5
2.2. Silis Dumanı İle Üretilen Taze Betonun Özellikleri	7
2.2.1. Su ihtiyacı ve işlenebilme	7
2.2.2. Hava sürüklenme	9
2.2.3. Terleme	9
2.2.4. Ayırışma	9
2.2.5. Priz süreleri	10
2.2.6. Sıcaklık yükselmesi ve hidratasyon ısısı	10
2.2.7. Plastik rötre	11
2.3. Silis Dumanı İle Üretilen Sertleşmiş Betonun Özellikleri	11
2.3.1. Basınç dayanımı	11
2.3.2. Elastisite modülü	15
2.3.3. Rötre	15
2.3.4. Sünme	16
2.3.5. Çekme ve eğilme dayanımı	16
2.3.6. Aşınma	16
2.4. Silis Dumanı İle Üretilen Betonun Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri	17
2.4.1. Geçirimsizlik	17
2.4.2. Donma-çözülme dayanıklılığı	18
2.4.3. Alkali-agrega reaksiyonu	19

2.4.4. Zararlı kimyasallara dayanıklılık	20
2.4.5. Çelik donatı korozyonu	22
2.4.6. Deniz ortamına dayanıklılık	24

3. SİLİS DUMANI

3.1. Giriş	25
3.2. Türkiye'de Silis Dumanı Üretimi	26
3.2.1 Ferrosilisyum tesisi ve üretim yöntemi	26
3.2.2. Silikoferrokrom tesisi ve üretim yöntemi	27
3.3. Fiyat, Satış Şekli ve Üretim Kapasitesi	28

4. ARAŞTIRMADA KULLANILAN MALZEME, PROGRAM ve YÖNTEM

4.1. Malzeme	32
4.1.1. Silis dumanı	32
4.1.2. Portland çimentosu	33
4.1.3. Karma suyu	33
4.1.4. Süper akışkanlaştırıcı katkı	33
4.1.5. Standard kum	33
4.1.6. Agregat	35
4.1.7. Su/Bağlayıcı oranı	37
4.1.8. Karışım oranı ve hesabı	38
4.1.9. Tartışma	39
4.2. Program ve Yöntem	42

5. SİLİS DUMANININ ÇİMENTONUN HİDRATASYONU ÜZERİNE ETKİSİ

5.1. Giriş	44
5.2. X-Işını Difraktogramı	50
5.2.1. Giriş	50
5.2.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	50
5.2.3. Tartışma	58
5.3. Differansiyel Termal Analiz Grafikleri	60
5.3.1. Giriş	60
5.3.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	60
5.3.3. Tartışma	68

6. TOZ, HAMUR ve HARÇLAR ÜZERİNDE YAPILAN DENEYLER ve SONUÇLARI

6.1. Toz Karışımları Üzerinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları	71
6.1.1. Giriş	71
6.1.2. Deney yöntemi ve sonuçları	73
6.1.3. Tartışma	75
6.2. Hamur Karışımları Üzerinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları	75
6.2.1. Giriş	75
6.2.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	76
6.2.3. Tartışma	77
6.3. Harç Karışımları Üzerinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları	78
6.3.1. Kıvam	78
6.3.1.1. Giriş	78
6.3.1.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	78
6.3.1.3. Tartışma	80
6.3.2. Aktivite	80
6.3.2.1. Giriş	80
6.3.2.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	81
6.3.2.3. Tartışma	83
6.3.3. Basınç ve eğilmede çekme dayanımı	83
6.3.3.1. Giriş	83
6.3.3.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	84
6.3.3.3. Tartışma	91
6.3.4. Harçlarda boy değişimine sülfat etkisi	92
6.3.4.1. Giriş	92
6.3.4.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	101
6.3.4.3. Tartışma	109

7. BETON ÜZERİNDE YAPILAN DENEYLER ve SONUÇLARI

7.1. Kıvam	110
7.1.1. Giriş	110
7.1.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	110
7.1.3. Tartışma	111
7.2. Birim Ağırlık	112
7.2.1. Giriş	112

7.2.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	112
7.2.3. Tartışma	114
7.3. Sertleşmiş Betonların Bazı Temel Özellikleri	114
7.3.1. Giriş	114
7.3.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	114
7.3.3. Tartışma	118
7.4. Basınç Dayanımı	118
7.4.1. Giriş	118
7.4.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	119
7.4.3. Tartışma	123
7.5. Donma-Çözülme Dayanımı	124
7.5.1. Giriş	124
7.5.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	127
7.5.3. Tartışma	134
7.6. Sürtünme Yolu İle Aşınma Kaybı	139
7.6.1. Giriş	139
7.6.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	140
7.6.3. Tartışma	143
7.7. Çarpma Dayanımı	144
7.7.1. Giriş	144
7.7.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	146
7.7.3. Tartışma	154
7.8. Kuruma Rötresi ve Şişme	155
7.8.1. Giriş	155
7.8.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	157
7.8.3. Tartışma	167
7.9. Zararlı Kimyasallara Dayanıklılık	168
7.9.1. Giriş	168
7.9.2. Deney yöntemi ve sonuçlar	169
7.9.3. Tartışma	173
8. SONUÇ ve ÖNERİLER	175
KAYNAKLAR	182

ŞEKİLLER LİSTESİ

3.1. Ferrosilisyum Üretim Aşaması ve Silis Dumanlarının Tutulması	30
3.2. Silikoferrokrom Üretim Aşaması ve Silis Dumanlarının Tutulması	31
4.1. Elazığ-Palu Agregası Granülometri Eğrisi	37
5.1. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 3 Saatlik X-Işını Difraktogramı	52
5.2. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 24 Saatlik X-Işını Difraktogramı	53
5.3. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 3 Günlük X-Işını Difraktogramı	54
5.4. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 7 Günlük X-Işını Difraktogramı	55
5.5. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 28 Günlük X-Işını Difraktogramı	56
5.6. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 90 Günlük X-Işını Difraktogramı	57
5.7. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 3 Saatlik DTA ve TGA Grafikleri	62
5.8. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 24 Saatlik DTA ve TGA Grafikleri	63
5.9. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 3 Günlük DTA ve TGA Grafikleri	64
5.10. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 7 Günlük DTA ve TGA Grafikleri	65
5.11. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 28 Günlük DTA ve TGA Grafikleri	66
5.12. Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 90 Günlük DTA ve TGA Grafikleri	67

6.1. FeSi Katkıllı Harçların Basınç Dayanımları	87
6.2. SiFeCr Katkıllı Harçların Basınç Dayanımları	88
6.3. SA Katkıllı FeSi'li Harçların Basınç Dayanımları ..	88
6.4. SA Katkıllı SiFeCr'lu Harçların Basınç Dayanımları	89
6.5. Fesi Katkıllı Harçların Eğilmede Çekme Dayanımları	89
6.6. SiFeCr Katkıllı Harçların Eğilmede Çekme Dayanımları	90
6.7. SA Katkıllı FeSi'li Harçların Basınç Dayanımları ..	90
6.8. SA Katkıllı SiFeCr'lu Harçların Basınç Dayanımları	91
6.9. Suda Koruman FeSi Katkıllı Harçlarda Boy Değişimi .	105
6.10. Suda Koruman SiFeCr Katkıllı Harçlarda Boy Değişimi	105
6.11. Suda Koruman SA Katkıllı FeSi'li Harçlarda Boy Değişimi	106
6.12. Suda Koruman SA Katkıllı SiFeCr'lu Harçlarda Boy Değişimi	106
6.13. Na ₂ SO ₄ Çözeltisinde Korunan FeSi Katkıllı Harçların Boy Değişimi	107
6.14. Na ₂ SO ₄ Çözeltisinde Korunan SiFeCr Katkıllı Harçların Boy Değişimi	107
6.15. Na ₂ SO ₄ Çözeltisinde Korunan SA Katkıllı FeSi'li Harçların Boy Değişimi	108
6.16. Na ₂ SO ₄ Çözeltisinde Korunan SA Katkıllı SiFeCr'lu Harçların Boy Değişimi	108
7.1. Betonlarda Su Emme Oranları	117
7.2. Betonlarda Boşluk Oranları	117
7.3. Fesi Katkıllı Betonlarda Basınç Dayanımı	121
7.4. SiFeCr Katkıllı Betonlarda Basınç Dayanımı	121
7.5. SA Katkıllı Fesi'li Betonlarda Basınç Dayanımı	122
7.6. SA Katkıllı SiFeCr'lu Betonlarda Basınç Dayanımı ..	122
7.7. Fesi Katkıllı Betonlarda PGH Gelişimi	132

7.8. SiFeCr Katkıllı Betonlarda PGH Gelişimi	132
7.9. SA Katkıllı FeSi'li Betonlarda PGH Gelişimi	133
7.10. SA Katkıllı SiFeCr'lu Betonlarda PGH Gelişimi	133
7.11. Betonların Elastisite Modülünde Meydana Gelen Azalma	134
7.12. SD Katkısının Betonlarda Sürtünme Yolu İle Aşınma Kaybına Etkisi	152
7.13. Çarpma Deneyi Genel Karakteristik Sonuçlarının Eşdeğer Küp Basınç Dayanımına Dönüştürülmesi	149
7.14. H= 25 cm İçin Çarpma Dayanımı	151
7.15. H= 35 cm İçin Çarpma Dayanımı	152
7.16. ADS= 5 ve H= 25 cm İçin Çarpma Dayanımı	153
7.17. ADS= 4 ve H= 35 cm için Çarpma Dayanımı	153
7.18. FeSi Katkıllı Betonlarda Kuruma Rötresi	163
7.19. SiFeCr Katkıllı Betonlarda Kuruma Rötresi	163
7.20. SA Katkıllı FeSi'li Betonlarda Kuruma Rötresi	164
7.21. SA Katkıllı SiFeCr'lu Betonlarda Kuruma Rötresi ..	164
7.22. FeSi Katkıllı Betonlarda Şişme	165
7.23. SiFeCr Katkıllı Betonlarda Şişme	165
7.24. SA Katkıllı FeSi'li Betonlarda Şişme	166
7.25. SA Katkıllı SiFeCr'lu Betonlarda Şişme	166
7.26. Beton Numunelerinin Zararlı Çözeltiler Karşısında Şekil Deformasyonları ve Görsel Dayanıklılık İndisleri	173

TABLOLAR LİSTESİ

2.1. Gelişmiş Bazı Ülkelerde Tutulan Silis Dumanlarının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	7
3.1. Silis Dumanlarının Fiyat, Satış Şekli ve Üretim Kapasitesi	29
4.1. Deneylerde Kullanılan Çimento ve Silis Dumanlarının Özellikleri	34
4.2. Çimento ve Silis Dumanlarının Kimyasal ve Karmaşık Bileşimleri	35
4.3. Deneylerde Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellikleri	36
4.4. Kontrol Betonu İçin Malzeme Miktarı	38
4.5. Beton Karışımları	39
4.6. Araştırma Programı	43
5.1. X-Işını Difraktogramı Deneyi Numunelerinin Karışım Oranları	51
6.1. Katkılı ve Katkısız Çimentoların Yeni Kimyasal Bileşimi	73
6.2. İncelik Deneyi Sonuçları	74
6.3. Priz Süreleri ve Hacim Genleşme Deney Sonuçları	77
6.4. Kıvam Deneyi Sonuçları	79
6.5. Aktivite Deney Sonuçları	82
6.6. Basınç Dayanım Deney Sonuçları	85
6.7. Eğilmede Çekme Dayanım Deney Sonuçları	86
6.8. Sülfat Miktarının Kritik Değerleri	96
6.9. Boy Değişimine Sülfat Etkisi Deney Sonuçları	104
7.1. Kıvam Deney Sonuçları	111
7.2. Birim Ağırlık Deney Sonuçları	113
7.3. Betonların Bazı Temel Özellikleri	116
7.4. Betonlarda Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları	120

7.5. Donma-Çözülme Deneyi Sonuçları	131
7.6. Donma-Çözülmede Görsel Dayanıklılık İndisleri	135
7.7. Betonlarda Sürtünme Yolu İle Aşınma Kaybı	142
7.8. Çarpma Uygulaması Öncesi Deneme Karışımlarının Genel Karakteristikleri	150
7.9. H=25 cm İçin Çarpma Deneyi Sonuçları	151
7.10. H=35 cm İçin Çarpma Deneyi Sonuçları	152
7.11. Kuruma Rötresi Deneyi Sonuçları	161
7.12. Şişme Deneyi Sonuçları	162
7.13. Zararlı Kimyasallara Dayanıklılık Deney Sonuçları .	172

FOTOGRAFLAR LİSTESİ

4.1. Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi	
Tesisleri'nde Tutulan Silis Dumanları	32
4.2. Elazığ-Palu Agregası	36
6.1. Basınç ve Eğilmede Çekme Dayanım Deneyine Tabi	
Tutulan Harç Numuneleri	87
6.2. Boy Değişim Deneyine Tabi Tutulan Numuneler	102
6.3. Boy Değişim Deneyi İçin Yapılan Kalıp	103
6.4. Boy Değişim Deneyi Uygulaması	103
7.1. Donma-Çözülme Sonunda Betonların Genel Görünümü ..	130
7.2. Donma-Çözülmeden Zarar Görmüş Beton Numuneleri ...	130
7.3. Böhme Yüzey Aşındırma Aleti ve Uygulaması	143
7.4. Çarpma Uygulaması	148
7.5. Ultrasonik Puls Geçiş Hızının Bulunması	149
7.6. Betonlarda Kuruma Rötresi ve Şişme İçin Yapılan	
Çelik Kalıp	158
7.7. Ölçüm Pimlerinin Yerleştirilmesi	159
7.8. Numunelerin Kalıplardan Çıkarılması	159
7.9. Havada Korunan Beton Numuneleri	160
7.10. Suda Korunan Beton Numuneleri	160
7.11. Zararlı Kimyasal Çözelti İçerisinde Bekletilen	
Beton Numuneleri	171
7.12. Kimyasal Çözelti İçindeki Betonların	
1 Yıl Sonu Görünümleri	171

SİMGELER LİSTESİ

A	: Alan; Sürekli Fazın Aşınan Kesitteki Yüzey Alanı; Al_2O_3
A_{dky}	: Betonun Doygun, Kuru Yüzey Ağırlığı
A_n	: Betonun Net Alanı
A_{sa}	: Betonun Su İçindeki Ağırlığı
ACI	: American Concrete Institute
AK	: Aşınma Kaybı
AM	: Alümin Modülü
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BA	: Birim Ağırlık
BD	: Boy Değişimi; Basınç Dayanımı
C	: CaO
$Ca(OH)_2$	: Portlandit, CH
$CaSO_4$	: Anhidrit
C_4AH_{13}	: $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$ (Hidrate Olmuş Kalsiyum Alüminat)
$C_4AS \cdot H_{12}$	: $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SO_4 \cdot 12H_2O$
$C_4AC \cdot H_{11}$	: $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CO_3 \cdot 11H_2O$
C-S-H	: Kalsiyum-Silikat-Hidrat (Tobermorit Jeli)
C_3S	: Trikalsiyum Silikat ($3CaO \cdot SiO_2$)
C_2S	: Bikalsiyum Silikat ($2CaO \cdot SiO_2$)
C_3A	: Trikalsiyum Alüminat ($3CaO \cdot Al_2O_3$)
C_4AF	: Tetrakalsiyum Ferro Alüminat ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$)
D_{max}	: Agreganın Maksimum Boyutu
DTA	: Differansiyel Thermal Analysis
E	: Elastisite Modülü
EDBD	: Eşdeğer Küp Basınç Dayanımı
Etrenjit	: Hidrate Trikalsiyum Sülfoalüminat ($C_6AS_3 \cdot H_{32}$)
fcm	: Karışım Hesabı İçin Hedef Alınan Ortalama Beton Basınç Dayanımı

F	: Fe_2O_3
FeSi	: Ferrosilisyum
F10	: %90 PÇ+%10 FeSi Katkılı Hamur, Harç, Beton Numunesi
F10A	: Beton Katkı Maddesi Katkılı ve %90 PÇ+%10 FeSi Karışımlı Hamur, Harç, Beton Numunesi
GD	: Görsel Dayanıklılık İndisi
g	: Yer Çekim İvmesi; gram
H	: Numune Kalınlığı; Ağırlık Düşürülme Mesafesi; H_2O
H_k	: Ölçme Kabın Net Hacmi
HM	: Hidrolik Modül
H_o	: Beton Numunesinin İlk Hacmi
H_s	: Beton Numunesinin Son Hacmi
K	: Kontrol (%100 PÇ) Hamuru, Harcı, Betonu; Eşdeğerlik Faktörü
KA	: Beton Katkı Maddesi Kullanılan Kontrol Hamuru, Harcı, Betonu
KDF	: Kireç Doyma Faktörü
kg	: Kilogram
M	: MgO
MH	: $\text{Mg}(\text{OH})_2$
MS^-	: MgSO_4
N	: Na_2O
NS^-	: Na_2SO_4
PÇ	: Portland Çimentosu
PGH	: Ultrasonik Puls Geçiş Hızı
Pk	: Beton Numunesinin Taşıyabileceği Maksimum Kuvvet
R	: Çap
S^-	: SO_3
SD	: Silis Dumanı
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı ve Priz Hızlandırıcı Katkı

S/B	: Su/Bağlayıcı (Su/Çimento; Su/Çimento+Silis Dumanı)
SiFeCr	: Silikoferrokrom
S10	: %90 PÇ+%10 SiFeCr Katkılı Hamur, Harç, Beton Numunesi
S10A	: Beton Katkı Maddesi Katkılı ve %90 PÇ+%10 SiFeCr Karışımli Hamur, Harç, Beton Numunesi
SM	: Silikat Modülü
T.Ç.M.B.	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı
TGA	: Thermal Granuometric Analysis
TS	: Türk Standardları
vb	: Ve benzeri
vd	: Ve diğlerleri

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan ülkelerde, çeşitli sektörlerin üretim artışı bazı maddeler atık durumdadır. Bu maddeler konusunda, atıkların işe yaramaz olarak düşünülmesi eğilimi yavaş yavaş kaybolmaktadır. Atık maddeleri, çeşitli sektörlerde değerlendiren ülkelerin gerek doğal kaynakları ve gerekse ulusal ekonomileri olumlu yönde etkilenmektedir.

Ülkemizde endüstriyel atıklardan uçucu kül, yüksek fırın curufu ve diğer doğal puzolanlar mineral katkı maddesi olarak bilinirler. Harç ve beton üretiminde genellikle ikincil bağlayıcı madde olarak portland çimentosunun ağırlık yüzdesi oranında, çimentonun bir kısmı yerine veya ilave olarak bazen de çimentoya önceden karıştırılarak katkılı çimento şeklinde kullanılmışlardır. Bu temel düşünceden hareketle, gelecekte kullanım potansiyeli en büyük yapı malzemesi olan katkılı ve katkısız çimentonun bileşimine giren maddelerin gerek temininde ve gerekse çeşitliliğinde karşılaşılan zorlukların çözümlenmesine katkıda bulunulması öngörülmüştür.

Mineral katkı maddeleri taze betonun işlenebilme ve su ihtiyacı ile reolojik özellikleri; terleme, ayrışma, hava sürüklenme, hidrasyon ısı ve plastik rötre gibi özelliklerine etki ettiği bilinmektedir. Yukarıda verilen niteliklere sahip puzolanlar doğada her zaman hazır olarak bulunmadığı için, çimento ve/veya betonda puzolanik amaçla kullanılmaları durumunda, etkilerinin veya etki derecelerinin hangi düzeyde olabileceğinin bilinmesi gereklidir.

Sertleşmiş betonda da bu maddeler mekanik özelliklere ve durabiliteye oldukça önemli etkiler yaparlar. Dayanımlar ve dayanım kazanma hızı ile elastisite modülü, sünme ve rötre mineral katkı maddelerinin kullanımından etkilenirler.

Geçirimsizlik, asitlere ve sülfata dayanıklılık, alkali-agrega reaksiyonu, donma-çözülme tekrarlarına dayanıklılık, katkıların kullanımından etkilenmektedir. Mineral katkı maddelerinin yukarıda açıklanan özelliklere olan etkilerinin yönü ve şiddeti genellikle katkının cinsi, kullanım miktarı, kullanım yöntemi, fiziksel, kimyasal ve puzolanik özellikleri ile yakından ilişkilidir.

Atık maddelerin değerlendirilmesi, enerji tasarrufu ve betonda ekonomi sağlanması, beton özeliğinin iyileştirilmesi, yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılması konusunda mineral katkı maddelerinin rolü üzerinde çok yoğun araştırma, geliştirme ve uygulamalar halen devam etmektedir.

Ülkemizde endüstriyel atık olan ferrosilisyum (FeSi) ve silikoferrokrom (SiFeCr) baca tozları (Fotograf 1.1) Antalya'da Etibank Elektrometalurji İşletmesi tarafından gerek çevre kirlenmesine engel olmak, gerekse değişik kullanım amaçlarına yönelik bir yan ürün olarak tutulmaktadır. İşletmenin silisyum ve ferrosilisyum fırınlarına özel filtre toz tutucularla elde edilen dumanların kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi, bu tozların **silis dumanı**, **silis baca tozu** veya **silis tozu** olarak nitelendirilmesi mümkündür.

Bu çalışmada, söz konusu baca tozları **silis dumanı** olarak ifade edilmiştir. Silis dumanı (SD), söz konusu işletmenin açık elektrik ark fırınlarında kuvarsın 2000°C 'de indirgenmesi ile ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıkta gaz haline geçen SiO , soğutma sırasında yükseltgenerek SiO_2 halinde birilmektedir. Ani soğutma nedeniyle kristalleşemeyen SiO_2 amorf yapıda ve çok küçük partiküller halinde oluşmaktadır.

1.1. Amaç

Bu doktora tez çalışması ile, Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi silis dumanlarının; fiziksel ve kimyasal özelliklerinin ortaya çıkartılması, hamurlar üzerinde X-ışını difraktogramı, differansiyel termal analiz (DTA) ve termogravimetrik analiz (TGA) grafikleri ile çimento hidratasyonu üzerine etkilerinin, hacim sabitliği, priz süreleri ve kıvam, harç karışımların zamana bağlı olarak (1 yıl) basınç ve eğilmede çekme dayanım gelişimi ve sülfat direnci araştırılması düşünülmüştür. Silis dumanlı taze beton karışımların kıvam ve birim ağırlık ve sertleşmiş SD katkılı betonlarda zamana bağlı olarak (1 yıl) basınç, donma-çözülme, çarpma, sürtünme yolu ile aşınma kaybı, kuruma rötresi, şişme, zararlı kimyasallara karşı dayanıklılık yanında sertleşmiş betonların bazı temel özelliklerinin (özellik ağırlık, su emme ve boşluk oranı) ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda bir çalışma, Türkiye'deki SD üzerine ilk defa yapılmıştır. Bölüm 2'de "Kaynak Araştırması"nda da görüleceği gibi SD'nin çarpma dayanımı, sürtünme yolu ile aşınma kaybı, donma-çözülme dayanımı, rötire, şişme vb konularında fazla araştırma bulunmamaktadır.

1.2. Yöntem

Yukarıda açıklanan amaçlara ulaşabilmek için, deneysel çalışma ve tarama yöntemleri kullanılmıştır. Araştırma, deneylerden elde edilen veriler üzerine yürütülmüş, bunun yanı sıra tarama yöntemi ile elde edilen bilgiler uzman kişilerin görüşleri ışığında yorumlanmıştır.

1.2.1. Evren ve örneklem

Araştırmmanın evreni ayrıca örnekleme temsil etmiştir. Evren ve örneklem Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Tesisleri'nde tutulan silis dumanlarıdır (FeSi ve SiFeCr).

1.2.2. Veri toplama yöntemi

Deneylere tabi tutulan FeSi ve SiFeCr dumanlarının fiziksel ve kimyasal analizlerinin yanı sıra; X-ışını difraktogramı, DTA ve TGA grafikleri ile çimento hidratasyon gelişimi incelenmiştir. FeSi ve SiFeCr'lu taze hamur ve harçlarla ilgili veriler, hacim genleşmesi, priz başlama ve sonu, incelik ile kıvam deneylerinden, sertleşmiş harçlarla ilgili veriler ise, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve sülfatın boy değişimine etkisi deney sonuçlarına bağlı olarak ortaya çıkarılmıştır.

Taze betonla ilgili veriler; çökme ve birim ağırlık deney sonuçlarından, sertleşmiş betonla ilgili veriler ise, basınç dayanımı, donma-çözülme, sürtünme yolu ile aşınma kaybı, çarpma dayanımı, kuruma rötresi, şişme, zararlı kimyasallara dayanıklılık ve sertleşmiş betonların bazı temel özellikleri deney sonuçlarından elde edilmiştir. Tüm veriler laboratuvar ortamındaki çalışmaların sonucu olup, TS ve ASTM'de öne sürülen standard deney metodları kullanılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Giriş

Silis dumanının değerlendirilmesi konusunda ilk çalışmalar 1950'li yıllarda Norveç'te başlamıştır. Çok ince taneli ve puzolanik değeri yüksek olan bu maddenin çimento katkısı olarak kullanımı NORCEM firması tarafından 1969'da denendi. Bu konudaki uygulamalar ve SD'nin beton içindeki davranışı ile ilgili araştırmalar, çoğunlukla İskandinav ülkelerinde olmak üzere, 1980'li yılların başına kadar oldukça gelişti.

Silis dumanlarının betonda katkı maddesi olarak kullanılması süper akışkanlaştırıcı katkıların geliştirilmesi sonucu giderek yaygınlaşmıştır. SD'nin birçok beton özeliği üzerindeki olumlu etkilerinin ortaya çıkarılması ve endüstriyel atıkların çevre kirliliğine karşı sıkı kontrolü gibi etkenler SD konusundaki çalışmaların son 10 yıl içerisinde hızla yaygınlaşmasına neden olmuştur.

1983 yılında başlayan ve uçucu kül, SD ve curuf gibi yan ürünlerin betonda kullanımını konu alan uluslararası konferanslar dizisi büyük ilgi görmekte olup, son toplantı 1992 yılında İstanbul'da yapılmıştır. Bugün, SD artık bir endüstri atığı değil, ekonomik değeri olan bir beton katkı maddesi haline gelmiştir. 1989 yılında dünyada toplam SD üretimi yaklaşık 1 milyon ton olup, A.B.D. 130 bin ton ile ilk sırayı alırken, Norveç 120 bin ton ile ikinci sırada yer almıştır.

Diğer puzolanlara benzer olarak SD'nin çimento hidratasyonu sırasında en önemli rolü, C_2S ve C_3S hidratasyonları sonucu oluşan kalsiyum hidroksiti ($Ca(OH)_2$) bağlamak ve yeni bir kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli meydana getirmektir.

Bu jel, çimento hamurunda normal olarak oluşan C-S-H jelinden biraz farklı olup, yoğunluğu daha az ancak geçirimsizliği daha fazladır. Kireç eriyiği ile yapılan çalışmalarda, SD'nin eriyik içinde hızla çözöldüğü, geçici bir süre için SD tane yüzeylerinde bir silis jelinin tabaka halinde çöktüğü ve daha sonra bu tabakanın kısmen C-S-H jelinin oluşmasına neden olduğı öne sürölmektedir. Silis tabakası modeli, SD katkısının su gereksiniminin artması, çimento hamurundaki erken katılaşma ve plastik büzölmedeki artış gibi etkileri açıklayabilmektedir.

SD içeren çimento hamurları X-ışını analizlerinde kristal Ca(OH)_2 görölmemesi bütün kirecin SD tarafından bağlandığı anlamına gelmeyebilir. Bu durum, SD tanelerinin büyük kristaller yerine çok sayıda; daha küçük ve daha sağlam Ca(OH)_2 kristallerinin oluşmasına yardımcı olmaları ile de açıklanabilir. Küçük kürecikler halindeki SD taneleri uygun ölçüde beton katkı maddesi (SA) kullanılması halinde, çimento taneleri arasında boşluklardaki suyun yerini alarak daha yoğun bir çimento hamuru meydana getirirler. SD katılmış çimento hamurlarının, akma sınırı ve viskozitelerinde artış gözlenmektedir. Benzer şekilde, normal betonlarda zayıf bölge olarak bilinen iri agrega-hamur ara yüzeyleri civarı SD katılması durumunda büyük Ca(OH)_2 kristalleri ile porozitenin azalması sonucu ilave dayanım kazanmaktadır (Yeğınobalı, 1993).

Gelişmiş bazı ölkelerde tutulan bazı silis dumanlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Ölkemizde Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi tarafından tutulan silis dumanlarının kimyasal bileşimi, Tablo 2.1'de verilen kimyasal bileşimler ile benzerlik arz etmektedir.

Tablo 2.1, Gelişmiş Bazı Ülkelerde Tutulan Silis Dumanlarının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Sugita, 1992; Berebe, 1992; Mangat, 1992; Tazawa, 1992).

	NORVEÇ (%)	JAPONYA (%)	KANADA (%)	A.B.D. (%)	İNGİLTERE (%)
SiO ₂	90-96	90-97	74-95	90-93	90-92
Al ₂ O ₃	0.5-3	0.09-1	0.1-0.7	0.5-0.6	0.5-0.7
Fe ₂ O ₃	0.2-0.8	0.009-4	0.3-7	3-4.5	1.2-2
CaO	0.1-0.5	0.11-1	0.4-1	0.5-0.9	0.2-1
MgO	0.5-1.5	0.09-2	0.4-1.5	0.3-0.5	0.2-1
SO ₃	-----	-----	0.1-0.8	0.4-1.3	-----
K ₂ O	0.4-1	-----	1-3	0.1-0.2	-----
Na ₂ O	0.2-0.7	-----	0-2	0.1-0.3	0-2
TiO ₂	-----	-----	-----	-----	-----
MnO	-----	-----	0.07-0.4	-----	-----
Kızd.Kayb.	0.7-2.5	1.5	2.5-8	1.4-4	-----
Özgül Ağı.	-----	2-2.4	-----	-----	-----
Özgül Yüz.	20000	20000	20000	20000	20000

2.2. Silis Dumanı İle Üretilen Taze Betonun Özellikleri

2.2.1. Su ihtiyacı ve işlenebilme

Küçük kürecikler halindeki SD taneleri daha büyük çimento tanelerinin arasındaki su ile yer değiştirerek granülometriyi iyileştirir ve serbest su miktarını artırırlar. Bu olumlu etkiye rağmen SD tanelerinin ıslanması gereken çok büyük toplam yüzey alanından dolayı, su ihtiyacı SD miktarı ile orantılı olarak artmasına neden olmaktadır. Bu durumda 1 m³ betona her 1 kg. SD için 1 lt. su ilavesi

önerilmektedir. Düşük dozlu betonlarda veya SD'nin, çimentonun %5'i civarında katılması halinde su ilavesine gerek kalmayabilir. Ancak, normal olarak SD katılması artsa bile su miktarını artırmadan ve hatta azaltarak aynı işlenebilmeyi sağlamak mümkün olmaktadır (Khayat ve Aitcin, 1992; Sellevold ve Radjy, 1983; Yeğınobalı, 1993).

Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, SD, çimento taneleri arasındaki çok küçük boşlukları doldurarak, hapsolmuş suyun serbest suya dönüşmesini sağlar. Bu arada, çok yüksek yüzey alanı nedeni ile absorbe olan su miktarı da artmaktadır. SD'nin betonun su ihtiyacına net etkisi, su/bağlayıcı oranı, SA kullanılması gibi etkenlere bağlıdır.

Yogendran vd (1987), çimentonun yerine %5 oranında SD kullanılması durumunda karşının ilave su ihtiyacına gerek göstermediğini ileri sürmektedirler.

Jahren'e (1983) göre, SD katılmış taze betonlar daha yapışkan olurlar. İşlenebilirliklerini bir süre koruyabilmeleri için ilk çökme değerinde 50 mm civarında bir artış öngörülmelidir.

Goncalvez'e (1992) göre, bağlayıcı miktarı 200, 300 ve 400 kg/m³ olan betonlarda %50'ye kadar çimentonun SD ile yer değiştirmesi durumunda sabit işlenebilme için gerekli su miktarı artmaktadır (Özturan, 1993).

Kakizaki vd (1992), yüksek dayanımlı betonlarda bileşenlerin değişik karıştırma yöntemlerinin etkilerini araştırmışlar ve çimento ile suyun önce karıştırılmasıyla çökme değerinin arttığını gözlemişlerdir.

Colin ve Menashi (1992) yaptıkları bir araştırmada, SD'nin çimentoya katılması sonucunda hamurun yayılma oranında (kıvamında) düşmelerin olduğunu gözlemişlerdir.

2.2.2. Hava sürüklenme

Khayat ve Aitcin (1992), SD kullanımının betonda sürüklenen hava miktarını azalttığını, ancak kohezyonun artması nedeniyle sürüklenmiş hava stabilitesinin arttığını ileri sürmektedirler.

Marchand vd (1992), SD ile üretilen silindirlenmiş betonda hava sürüklemenin son derece zor olduğunu ancak iyi bir kür ile donmaya karşı iyi dayanım elde edildiğini ileri sürmektedir.

2.2.3. Terleme

Burge'e (1983) göre, SD tanelerinin büyük yüzey alanı taze beton içindeki serbest suyun bir kısmını bağlar ve SD katkı miktarı ile orantılı olarak betonda ki terleme önemli miktarda azalır.

Jahren'e (1993) göre, SD katılmış taze betonlar hamur vizkozite ve yoğunluğunun artması ve yapışkanlıkları ile daha az ayrışır, oturma çatlaklarında da azalma görülür. İnceliği yüksek olan mineral katkılar taze betonda ki terlemeyi önlemekte ya da çok azaltmaktadır. SD çok yüksek özgül yüzeyi sayesinde serbest suyun bir kısmını absorbe ettiği için terleme azalmaktadır (Özturan, 1993).

2.2.4. Ayrışma

SD taze betonda vizkositeyi ve kohezyonu artırır, dolayısı ile ayrışmayı azaltır. Bu etki, SA kullanıldığında daha belirgin olmakta, ancak uzun süreli vibrasyon durumunda, özellikle yüksek işlenebilme özeliğine sahip

betonlarda bu iyileştirici etki kaybolmaktadır (Özturan, 1993).

2.2.5. Priz süreleri

Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, SD kullanımı priz sürelerini geciktirmektedir. Katkı miktarı çimento ağırlığının %10'unu geçmedikçe bu etki önemsenebilir. Kullanılan SA'nında priz geciktirici etkileri olacaktır. Örneğin: %15 SD ile SA içeren betonlarda priz başlangıç ve bitiş sürelerinde sırası ile 1 ve 2 saatlik gecikmeler gözlenmiştir.

2.2.6. Sıcaklık yükselmesi ve hidrasyon ısı

Sıcaklık yükselmesi ve hidrasyon ısı konusunda araştırmacılar farklı yaklaşımlarda bulunmaktadır.

Meland (1983), yaptığı araştırmada, çimento yerine %10 ve %20 oranlarında katılan SD'nin ilk iki günde toplam hidrasyon ısını azalttığını gözlemiştir. Ancak, %10 oranındaki SD ile ilk saatlerdeki ısı oluşma hızı artmaktadır. Linyosülfonat katkısının başlangıçtaki yavaşlatıcı etkisi de bu şekilde dengelenebilmektedir.

Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, SD'nin çimento yerine kullanılması durumunda, betonda sıcaklık yükselmesi azalmaktadır.

Goncalvez (1992), SD'nin çimentonun %10'u oranında kullanılması durumunda hidrasyon ısının arttığını, ancak daha yüksek yer değiştirme oranlarında hidrasyon ısında azalma olduğunu gözlemiştir (Özturan, 1993).

Malhotra (1993), SD'nin betonda sadece hidratasyon ısısının düşürülmesi amacı ile kullanımını öngörmemektedir. SD katkısının çimento hidratasyon ısısı üzerindeki etkileri değişebilmektedir.

Yogendran vd (1991), karışımlarda SD oranı arttıkça karışımın hidratasyon ısısının önemli ölçüde düştüğünü ileri sürmektedirler.

2.2.7. Plastik rötire

Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, SD kullanımıyla terleme azaldığı için plastik rötire riski de artmaktadır.

Özyıldırım (1992), köprü tabliyelerinde ince kaplama olarak, silis dumanlı betonların oldukça önemli miktarda plastik rötire yapabildiklerini gözlemiştir.

SD katılmış betonlarda, terlemenin çok azalması veya hiç meydana gelmemesi, özellikle beton yüzeyinden buharlaşmanın fazla olduğu ortamlarda, plastik büzülmeden dolayı çatlama riskini artırır. Çatlakların oluşması priz başlangıcına kadar sürebilir. Bu süre içinde beton yüzeyinin örtülerek buharlaşmasının önlenmesi yararlı olur (Jahren, 1983; ACI, 1987; Khayat ve Aitcin, 1992; Yeğinobalı, 1993).

2.3. Silis Dumanı İle Üretilen Sertleşmiş Betonun Özellikleri

2.3.1. Basınç dayanımı

Bazı araştırmacılara göre, SD katkısının beton basınç dayanımına olan olumlu etkisi agrega-hamur geçiş bölgelerinin kuvvetlendirilmesinden dolayıdır. Diğer taraftan, en önemli faktörlerden birinin de daha sıkı ve

kaliteli bir çimento hamuru oluşturmaları olduğu öne sürülmektedir.

Aitcin ve Neville'e (1993) göre, SD kullanmaksızın yüksek dayanımlı beton (60-80 MPa) üretmek mümkündür.

Neville'e (1977) göre, betonun basınç mukavemeti iki faktöre bağlıdır. Bunlar, S/B oranı ve yoğunluk derecesidir. 1989 yılında Fransa'da yapılan Joigny köprüsünde S/B oranı 0.37 olan normal bir beton 28. günde 80 MPa'ya, 91. günde 87 MPa'ya ulaşmıştır. 1984 yılında Kanada'da (Montreal) yapılan La Laurentienne Building'de S/B oranı 0.27 olan SD katkılı betonlarda 28. günde 93 MPa, 91. günde ise 107 MPa'lık betonlar üretilebilmiştir.

Cordon'a (1979) göre, beton üç temel özeliğe sahip olmalıdır. Bunlar; betonun niteliği (kalitesi), işlenebilirliği ve ekonomik oluşudur.

Malhotra (1993) ve Jahren'e (1983) göre, SD'nin beton dayanım üzerindeki olumlu etkisi, uçucu kül ve curuf gibi atıklara oranla daha fazladır. Örneğin; eşdeğerlik faktörü (K), uçucu küllerde genel olarak, 1 değerini ancak 90 günlük dayanımlarda yakalayabilirken SD ile 7 ve 28 günlük dayanımlar bazında 2-5 arası olabilmekte, diğer bir deyimle 1 kg. SD 2-5 kg çimentoya eşdeğer sayılmaktadır.

Kakizaki vd'nin (1992) yaptıkları araştırmada, %12 SD içeren 0.25 S/B oranındaki betonlarda 7. günde 98 MPa, 28. günde 113-122 MPa ve 91. günde 127-138 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.

Holland vd'nin (1986) yaptıkları bir araştırmada, kontrol betonu 28. gün sonunda 39.4 MPa olurken, çimentonun yerine ve çimentonun %17.6 hacmi oranında SD'nin katılmasıyla 28. gün sonunda 49.5 MPa'lık basınç dayanımı elde edilmiştir.

Carette ve Malhotra (1992), SD'nin betonun uzun süreli dayanım kazanımı konusunda yaptıkları araştırmada, %10 SD

içeren 0.25 S/B oranındaki beton 3.5 yıl sonunda, 100 MPa civarında dayanıma eriştiğini gözlemişlerdir.

Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, normal bakım koşullarında SD'nin beton dayanımına olumlu etkisi 3-28. gün arasında olur. Ancak, S/B oranı 0.40 civarına indirerek 1 günlük dayanımları dahi yükseltmek mümkündür.

Cong vd'ne (1992) göre, beton dayanımlarının düzeltilmesinde SD önemli bir unsurdur. SD, hamur-agrega ara geçiş bölgelerini tıkayarak, betonların daha yüksek dayanımlı olmalarına neden olmaktadır.

Laamanen vd (1992), %8 oranında SD kullanılan betonlarda erken yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların dayanımlarının düştüğünü gözlemiştir.

Malolepszy ve Deja (1992), %5 ve %10 SD içeren harçlarda dayanımların kür şartlarından çok etkilendiğini gözlemişlerdir. Hava kürü, basınç dayanımlarında %40'a varan azalmalara neden olur. Bu azalma eğilmede çekme dayanımlarında daha fazla olmaktadır.

Konda vd (1992), yüksek sıcaklıklarda kür edilen SD'li betonların 7 günlük dayanımlarının yüksek olduğunu, ancak 4. hafta sonunda en yüksek dayanımların 20°C sıcaklıkta kür edilen betonlardan elde edildiğini gözlemişlerdir.

Johnston (1992), %10 SD içeren betonlarda 65°C'de hızlandırılmış kür uygulamasıyla, 16. saatte 28 MPa ve 28. günde 35-42 MPa basınç dayanımın sağlandığını gözlemiştir.

Skjeggerud vd (1992) göre, hava sürüklenmiş SD betonunda her %1 hava için basınç dayanımı %5 azalmaktadır (Özturan, 1993).

Sandvik ve Gjorv (1992), dozajın 185 ile 482 kg/m³, S/B oranının 0.45 ile 1.00, SD'nin %0 ile %20 arasında değiştiği betonlarda SD artışıyla dayanım gelişiminin çok farklı olduğunu bu nedenle de halen kullanılan dayanım tahmin

denklemlerinin SD betonu için değiştirilmesi gerektiğini ileri sürmektedirler.

Baalbaki vd (1992), SD, yüksek fırın curufu, uçucu kül ve portland çimentosunun değişik karışım oranlarının denendiği düşük S/B oranlı betonlarda, bir günde sadece SD betonlarının kontrol betonu dayanımını yakalarken, bir yıl sonunda tüm mineral katkılı betonların kontrol betonuna oranla daha yüksek dayanımlar (124-136 MPa) verdiğini gözlemişlerdir.

Shizawa vd (1992), çok ince öğütülmüş portland çimentosu ve ince öğütülmüş yüksek fırın curufu ile SD kullanılarak çok yüksek dayanımlı betonlar üretmişlerdir. Bu vesile ile, SD'nin dayanım üzerinde curufdan daha etkili olduğunu gözlemişlerdir. SD ve SA'nın birlikte kullanılması ile elde edilen yüksek dayanımlı betonlarda SD katkısı çimentonun ağırlıkça %15'i civarındadır. Bu betonlarda çimento dozajını 400-500 kg/m³ sınırının üstüne çıkarmak veya S/B oranını 0.30'un altına indirmek gibi zorlamalar fazla yarar sağlamamaktadır (Goldman ve Bentur, 1989; Yogendran vd, 1987; Yeğınobalı, 1993).

Kazuyuki ve Kawamura (1994) harçlar üzerinde yapmış oldukları araştırmada, SD'nin Ca(OH)₂ miktarını önemli ölçüde düşürerek ilave dayanım kazandığını gözlemlemişler. Bu araştırmaya göre, kontrol karışımı 28. gün sonunda Ca(OH)₂ miktarı %4.1 iken, %5 SD'nin kullanılması durumunda %3.1'e, %10 SD'de %2.3'e, %20 SD'de %1.3'e ve %30 SD'de %0.8'e düşmüştür.

Kawamura vd'ne (1987) göre, SD/Ç oranı %5 olan harç karışımında 3 ay sonunda Ca(OH)₂ miktarı %7-10 arasında olurken, %10'da tutulması durumunda bu oran %4-9 ve %15 düzeyinde tutulması durumunda ise %2-5 arasında kalmaktadır.

2.3.2. Elastisite modülü

Berke vd'ne (1992) göre, SD kullanılan betonlarda elastisite modülü önemli oranlarda artmaktadır.

Alfes (1992), %20 SD içeren yüksek dayanımlı betonlarda statik elastisite modülünün yaklaşık 85 MPa değerine ulaştığını gözlemiştir.

Khayat, Aitcin (1992) ve Burge'nin (1983) yaptıkları araştırmalarda, agrega-çimento hamurunun ara yüzey bölgesindeki olumlu etkisi nedeniyle SD katkısının betonda elastisite modülünün, basınç dayanımı kadar olmamakla beraber biraz arttığı gözlenmiştir.

2.3.3. Rötire

ACI Committee 226 (1987), Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, boşluk yapısının daha ince olması nedeniyle SD içeren betonlarda kuruma rötresi daha düşük olmaktadır. SD'nin betonda kuruma büzülmesine olan etkisi S/B oranı, beton yaşı ve ilk günlerdeki bakım koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir. S/B oranı 0.60'dan küçük olan betonlarda büzülme katkısız betonlardakinden farklı değildir.

Alfes'e (1992) göre, agrega tipi ve miktarı kuruma rötresini etkilemekte ve SD'nin kuruma rötresini önemli oranda azaltmaktadır.

Alou ve Houst'a (1992) göre, Tip I çimentosu, SD ve kum kullanılarak yapılan tamir harçlarında, kuruma rötresi daha düşük olmaktadır (Özturan, 1993).

2.3.4. Sünme

Smadi vd'ne (1987) göre, beton basınç dayanımı arttıkça sünme azalır. SD katkısı içeren yüksek dayanımlı betonlarda sünme katsayısı küçülmektedir.

Khayat ve Aitcin (1992), SD içeren betonların kontrol betonuna oranla daha az sünme yaptığını ileri sürerek, sünmenin dayanım artışı ile azaldığını belirtmektedirler.

Alou ve Houst'a (1992) göre, Tip I çimentosu, SD ve kum kullanılarak yapılan tamir harçlarında sünme daha yüksek olmaktadır (Özturan, 1993).

2.3.5. Çekme ve eğilme dayanımı

Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, SD katkılı betonların çekme eğilme dayanımı/basınç dayanımı oranı katkısız betonlarınkine benzemektedir. SD katkı miktarının artması veya SA kullanılmaması eğilme-basınç dayanım oranının katkısız betonlarınkinden daha küçük olmasına yol açacaktır (Yeğınobalı, 1993).

2.3.6. Aşınma

Holland vd'nin (1986) aynı cins agrega üzerinde yapılan aşınma kaybı araştırmasında, S/B oranı 0.45 olan kontrol betonu 72 saatlik aşınma uygulaması sonunda %6.9 oranında aşınma kaybı göstermiştir. Aynı şartlarda olmak üzere, çimentonun %17.6 hacmi oranında SD ve S/B oranı 0.53 olan betonlarda %5 ve çimentonun %42.9 oranında SD ve S/B oranı 0.21 olan betonlarda da %2.2'lik aşınma kaybı saptanmıştır.

2.4. Silis Dumanı İle Üretilen Betonun Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri

2.4.1. Geçirimsizlik

Betonun zararlı çevre etkilerine karşı dayanıklılığı büyük ölçüde su geçirimsizliğine bağlıdır. SD katkısı çimento hamurundaki toplam gözenek hacmini fazla değiştirmemekle beraber küçük gözenek sayısını artırırken, büyük gözenekleri azaltmakta, hamuru daha homojen ve geçirimsiz yapmaktadır. Bu olumlu etki, düşük dozlu betonlarda daha belirgindir. Genelde SD'nin geçirimsizliği artırma yönünde K faktörü basınç dayanımı için bulunan değerden daha fazladır (Gjorv (1983), ACI Committee 226 (1987) ve Khayat ve Aitcin'e (1992): Yeğinobalı, 1993).

Özturan'a (1992) göre, mineral katkı maddelerinin dayanıklılığı artırıcı fonksiyonlarının başında beton boşluk yapısını iyileştirmeleri ve dolayısıyla geçirimsizliği azaltmaları gelmektedir.

Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, SD çimento hamurunun geçirimsizliğini azaltmaktadır. Özellikle düşük dayanımlı betonlarda bu etki daha net görülmektedir. Ayrıca, SD betonun kuruma hızını ve difüzyon katsayısını azaltmaktadır.

Atlassi (1992), S/B oranını 0.30 ile 0.60 arasında değişen ve %0 ile %25 SD içeren betonlarda ortam rutubetinin %80'in altına düşmesi durumunda, SD'nin betonun içinde rutubet hareketlerini çok azalttığını ileri sürmektedir.

Morgan ve Wosiefer (1992), SD içeren ve içermeyen püskürtme betonlarının klor geçirgenliğini incelemişler ve SD içeren tüm karışımlarda çok düşük geçirgenlik elde etmişlerdir.

Long vd (1992), betonun geçirimliliğini yerinde test etmek için bir cihaz geliştirmişler. Elde ettikleri verilere göre % 5 SD kullanımının geçirimliliği azalttığını ve yüksek S/B oranlarında iyileştirmenin daha fazla olduğunu gözlemişlerdir (Özturan, 1993).

Seki vd (1992), SD, yüksek fırın curufu ve kolloid çimento kullanarak üretilen betonlarda su ve klor geçirimliliklerinin kontrol betonuna oranla azaldığını gözlemlemişlerdir (Özturan, 1993).

2.4.2. Donma-çözülme dayanıklılığı

Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, SD çimento hamurunun boşluk yapısını iyileştirmekte ve böylece daha küçük boyutlu boşluklarda suyun donma derecesi düşmekte olup, betonun donma-çözülme tekrarlarına dayanıklılığı artmaktadır.

Batrakov vd (1992), üç değişik tipte SD ile ürettikleri betonlarda, SD miktarı %10 olduğunda donmaya dayanıklılığın kontrol betonu ile aynı olduğunu, ancak SD'nin artmasıyla dayanıklılığın azaldığını ileri sürmektedir.

Alou ve Houst (1992), %10 oranında SD kullanarak ürettikleri tamir harçlarında donma dayanıklılığın yeterli düzeyde olduğunu gözlemişlerdir.

Hooton'a (1993) göre, SD'li karışımlar kontrol karışımına oranla donma-çözülme tekrarlarına karşı daha dayanıklıdır.

Long vd'ne (1992) göre, 0.70 S/B oranında normal beton daha çabuk kritik doygunluk derecesine ulaşmakta ve donmadan zarar görmektedir. SD'nin yararlı etkisi yüksek S/B oranlarında daha çok hissedilirken, SD miktarının artışıyla dayanıklılık artmaktadır (Özturan, 1993).

Jacobsen ve Sellevold (1992), hava sürüklenmemiş SD betonlarında buz çözücü tuzların etkisinde donma-çözülme deneyleri yapmışlar ve SD kullanımı ile dayanıklılığın arttığını gözlemişlerdir (Özturan, 1993).

2.4.3. Alkali-agrega reaksiyonu

Özturan'a (1992) göre, bazı reaktif agregalar çimentodaki alkali ve hidroksil iyonları ile reaksiyona girerek, genleşen jel oluştururarak, çimento hamurunun çatlamasına neden olmaktadır. Mineral katkı maddeleri genelde betonda alkali-agrega reaksiyonunu önleyici etkiye sahiptirler.

Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, SD'nin çimento hamurunda geçirimsizliği artırarak rutubetin agrega-harç ara yüzeyine ulaşmasını engellediğini, aynı zamanda boşluk suyundaki alkali ve hidroksil iyon konsantrasyonunu azalttığını ileri sürmektedirler.

Geiker ve Thaulow (1992), doymuş kalsiyum hidroksit ile sodyum klorür solüsyonları etkisine maruz harç çubuklarında, 20 hafta boyunca uzamaları ölçmüşler ve uçucu kül ile SD'nin alkali-agrega reaksiyonunu önlemede oldukça etkili olduğunu gözlemişlerdir.

Larbi ve Bijen (1992), yüksek fırın curufu, uçucu kül, SD, sentetik kolloidal silica ve metakaolin gibi çeşitli mineral katkıların kullanımı ile alkali-agrega reaksiyonu zararlı etkilerinin azaltılabileceği sonucuna varmışlardır.

2.4.4. Zararlı kimyasallara dayanıklılık

Kimyasal maddelerin betonu yıpratıcı etkileri çeşitli yollardan olabilir. Asitler kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek oluşan suda çözünen tuzların betondan ayrılmasına neden olurlar. Artan geçirimlilik betonu zararlı etkilere karşı daha zayıflatır. Sülfatlar kalsiyum hidroksit ve trikalsiyum alüminat jeli bulunan ortamlarda etrenjit jelini oluşturabilirler. Bu jel betonda şişme ve çatlamalara neden olur. Magnezyum ve amonyum sülfatlar ise C-S-H jelini ayrıştırabilirler. Yapılan araştırmalarda, SD katkısının asitlerin betona olan zararlı etkisini geciktirdiği ve genellikle betonun sodyum sülfata karşı direncini artırdığı görülmüştür.

Çimentonun %15'i yerine katılan SD ile sülfatlara dayanıklı çimento özellikleri elde edilebilmektedir. Bu olumlu etkiler SD katkısı ile betonda geçirimsizliğin artması ve kalsiyum hidroksit'in C-S-H jeline çevrilmesi ile açıklanabilir. Diğer taraftan, SD katkısı magnezyum sülfatlara karşı etkili olmamakta hatta direnci azaltmaktadır. Bu durum SD katkısı ile oluşan C-S-H jelinin bağlayıcı olmayan jellere dönüşmesi ve ayrışması ile açıklanabilir (Gjorv (1983), ACI (1987), Cohen ve Bentur (1988), Khayat ve Aitcin (1992), Madej (1992) ve Hooton (1993): Yeğinobalı, 1993).

Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, asit gibi zararlı kalsiyumlar, Ca(OH)_2 ile reaksiyona girip suda çözünen tuzlar oluştururlar. Bu tuzların betondan yıkanması ile geçirimlilik artmakta ve böylece zararlı kimyasalların beton içine girişi hızlanmaktadır. Sülfatlar da aynı tip reaksiyon sonucu genleşen ve betonda çatlaklar oluşturan etrenjit üretirler.

Al-Amouhi vd (1992), mineral katkılı betonların yüksek konsantrasyonlu sülfat ve klor içeren ortamlardaki davranışlarını incelemişler ve Tip I çimentosu ile kül karışımlarının en iyi sonuçları verdiğini, SD ve curuf içeren yüzeylerinde ise daha çok hasar oluştuğunu gözlemişlerdir.

Hooton (1993), %5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harç çubuklarından kontrol çubukları 90 gün sonunda önemli ölçüde boy değişimine maruz kalırken, değişik oranlarda SD içerikli çubukların çok az boy değişimine maruz kaldıklarını gözlemiştir.

Johnton (1992), 65°C hızlandırılmış kür uygulanmış ve %3 NaCl içinde donma deneylerine tabi tutulmuş, %10 SD içeren betonların kontrol betonlarına oranla buz çözücü tuzlara karşı daha dirençli olduklarını gözlemiştir.

Morgan ve Wolsiefer (1992), SD içeren püskürtme betonların buz çözücü tuzlara karşı iyi dayanım gösterdiğini ileri sürmektedir.

Skjeggerud vd'ne (1992) göre, SD'li betonlar kontrol betonlarına oranla daha düşük hava içermektedir.

Kazuyuki ve Kawamura'nın (1994) yaptıkları bir araştırmada, %10 Na_2SO_4 çözeltisinde kontrol harç çubukları 6 ay sonunda %0.5 oranında boy değişimine maruz kalırken, SD ile değişik oranlarda üretilmiş harçlarda 36 ay sonunda çok az (%0.1 oranında) boy değişimine maruz kalmıştır. Aynı araştırmada, %10 MgSO_4 çözeltisine konulan karışımlardan kontrol numunesi bir yıl sonunda en çok boy değişimine maruz kalırken, %20 ve %30 SD katkılı numunelerin kontrol numunesine göre daha az boy değişimine maruz kaldığı, %5 ve %10 SD katkılı numunelerin ise 3. yıl sonunda dahi çok az boy değişimine uğradıkları ileri sürülmektedir.

2.4.5. Çelik donatı korozyonu

Beton içine gömülü çelik donatı çubuklarının çevresindeki pH değeri yüksek ortam, çeliğin yüzeyinde korozyonu önleyici pasif bir demir oksit tabakası bulunmasını sağlar. Bu tabaka, klor iyonlarının etkisi veya pH değerinin yaklaşık 11.5'in altına düşmesi ile parçalanır ve çelikte korozyon devam eder. Ortamdaki kalsiyum hidroksitin C-S-H jeli olarak puzolanlar tarafından bağlanması veya beton yüzeyinden sızan hava içindeki CO₂ ile karbonatlaşması pH değerinin düşmesine yol açacaktır. Araştırma sonuçlarına göre, SD katkısı ile artan geçirimsizlik donatı çevresindeki betonda oksijen yayılmasını azaltmakta, elektrik direncini yükseltmektedir. Betonda %30 oranında katılan SD ile pH değerinin 12'nin altına düşmediği belirtilmektedir. SD katkısı, iyi beton yapma kurallarına uyulduğu takdirde karbonatlaşmanın ilerleme hızı da fazla etkilenmemekte hatta SA ile birlikte kullanıldığında azalmaktadır. Hızlandırılmış deneylerde %10 ve %20 olarak katılan SD ile korozyon başlangıcının önemli ölçüde geciktirdiği gözlenmiştir (Vennesland (1983), Gjorv (1983), Khayat ve Aitcin (1992) ve Rasheeduzzafar, vd (1992): Yeğinobalı, 1993).

Khayat ve Aitcin'e (1992) göre, SD, pH değerini biraz düşürse de, karbonatlaşma ve betonun çok daha geçirimsiz olması nedeniyle, donatıda korozyon riski artmamaktadır.

Carette ve Malhotra (1992), S/B oranı 0.25 ile 0.40 arası değişen ve %10 SD içeren betonların 3.5 yıl boyunca havada kür edilmesi durumunda, düşük S/B oranlarında karbonatlaşmanın çok önemsiz olduğunu, ancak S/B oranının artması ile karbonatlaşmanın da arttığını gözlemişlerdir.

Berke vd (1992), hızlandırılmış korozyon testinde SD'nin klor geçirgenliğini oldukça azalttığını gözlemişlerdir.

Yamato vd (1992), %10, %20 ve %30 oranlarında SD içeren 0.27 ve 0.55 S/B oranlarındaki betonlarda yaptıkları hızlandırılmış karbonatlaşma ile klor penetrasyonu deneylerinde, SD ilavesi ile betonda pH değerinin ve klor penetrasyon derinliğinin düştüğünü, SD'nin %20 ve %30 değerlerinde donatı korozyonunun yüksek S/B oranında arttığını, düşük S/B oranında ise azaldığını belirtmektedirler (Özturan, 1993).

Al-Amoudi vd (1992), sülfat-klorür solüsyonu etkisine maruz bırakılan SD ve yüksek fırın curufllu betonlar donatı korozyon hızının uçucu kül ve Tip I çimentosu ile yapılan betonlarda daha az olduğunu ve bütün mineral katkıların donatı korozyon hızını düşürdüklerini ileri sürmektedirler.

Philipose vd (1992), %75 curuf, %22 Tip 50 çimentosu ve %3 SD içeren bağlayıcı ile ürettikleri betonlardan yapılmış kirişleri (çekme deneyinde) 600 mikron deformasyona kadar yükleyip klor etkisine maruz bırakmışlar ve donatı korozyonunu incelemişlerdir. Pas payı, yük seviyesi, donatı aderansı, klor etkisi gibi parametrelerin araştırıldığı bu çalışmada katkılı çimento ile yapılan betonun hem yüklü hem de yüksüz durumda klor geçirgenliği kontrol betonunkinden daha az bulunmuştur.

Odsuki vd (1992), değişik korozif ortamlarda saklanan harç numunelerinde yüksek fırın curufu, SD, uçucu külün klor geçirgenliğini ve donatı korozyonunu azalttığını gözlemişlerdir (Özturan, 1993).

Rasheeduzzafar vd'nin (1992) yaptıkları araştırmada, %2 C₃A oranına sahip çimento 93 gün sonunda korozyon yapmaya başlarken, aynı çimentoya %10 SD katılması durumunda 345. günde korozyonun başladığını ileri sürmektedirler. Aynı

araştırmada, %14 C₃A'ya sahip Tip I imentosu 228. günde korozyona başlarken, aynı çimentoya %10 SD katılması durumunda 695. günde, %20 SD katılması durumunda ise 735. gün sonunda korozyonun başladığını ileri sürmektedirler.

2.4.6. Deniz ortamına dayanıklılık

Tokai vd (1992), su veya klor solüsyonu ortamında betonarme kirişlerinin yorulma ömrünü artırmak için SD'nin etkisini araştırmışlar ve aynı dayanımda SD ile yorulma ömrünün arttığını gözlemişlerdir (zturan, 1993).

3. SILİS DUMANI

3.1. Giriş

ACI Committee 226'ya (1987) göre, silis dumanı silisyum ve ferrosilisyum üretiminde elektrik ark fırınlarında kömür ile yüksek saflıktaki kuvarsitin indirgenmesi sonucu oluşmaktadır. Benzer şekilde, Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Tesisleri'nde tutulan silis dumanları, Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilen ferrosilisyum ve silikoferrokrom alaşımları üreten işletmenin yan ürünüdür. Silisyum ve ferrosilikon bileşiği, gaz akışını kolaylaştırmak için özel çubuklar yerleştirilmiş elektrik arklı fırında kömürün yakılması ile kuvarsın (SiO_2) indirgenmesi sonucunda oluşmaktadır. Ferrosilikon üretilirken, ortama demir ilave edilir. Bunun yanı sıra SiO_2 'nin silisyuma indirgenmesi direkt olmaz, özellikle fırın bölgesinde gaz halinde suboksit (SiO) meydana gelmektedir. Bu SiO gazının bir kısmı fırının üst kısmındaki diğer yakma gazları ile karışmaktadır. Daha sonra SiO dumanı havanın oksijeni ile temas ederek çok ince camsı tanecikler halinde yoğunlaşarak silis dumanı adını alır.

ACI Committee 226'ya (1987) göre, silis dumanının özgül yüzeyi çok yüksek olup (nitrogen adsorption tekniğine göre $20000 \text{ m}^2/\text{kg}$) portland çimentosu veya uçucu kül için olan $300-600 \text{ m}^2/\text{kg}$ değerine kıyasla yüksektir. Özgül ağırlığı ise $2.0-2.5 \text{ g/cm}^3$ olmaktadır. Karbon içeriğine göre açık gri veya gri renk taşımaktadır.

Silis dumanlarının kimyasal bileşimi, fırında üretilen metal veya alaşımın tipine göre değişmekte olup, hammaddenin saf olması halinde sabit bir değer taşıyabilmektedir.

3.2. Türkiye'de Silis Dumanı Üretimi

Ülkemizde silis dumanları Etibank Elektrometalurji İşletmesi'nin Antalya'daki tesislerinde elde edilmektedir. Fabrikanın ferrosilisyum (FeSi) ve silikoferrokrom (SiFeCr) fırınlarından özel filtrelili toz tutucularla elde edilen silis dumanlarının fiyat, satış şekli ve üretim kapasitesi Tablo 3.1'de, fiziksel özellik ve kimyasal bileşimi ise Tablo 4.1'de verilmiştir.

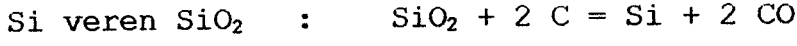
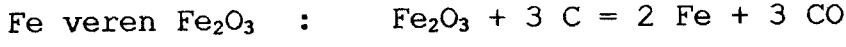
Antalya'da elde edilen silis dumanları doğal puzolan veya uçucu kül ile karşılaştırıldığında, yüksek SiO_2 içeriği, sabite yakın kimyasal bileşimi, çok düşük safsızlık içeriği, camsı faz ve oldukça yüksek inceliği nedeniyle beton üretimine uygun bir katkı maddesi olduğu ortaya çıkar.

3.2.1. Ferrosilisyum tesisi ve üretim yöntemi

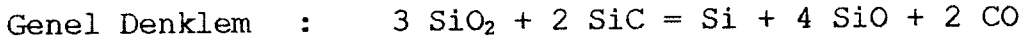
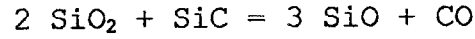
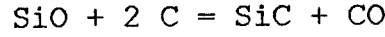
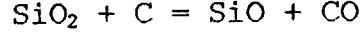
Ferrosilisyum tesisinin kuruluş tarihi 1978-1981 yılları arasında olup, kuruluş kapasitesi 5.000 Ton/Yıl'dır. 1993 yılında üretim kapasitesi 5.100 Ton/Yıl olarak gerçekleşmiştir.

İşletme tesislerinde %78 Si ihtiva eden ferrosilisyum üretimi 6000 kVA gücündeki ark-direnç fırınına kuvarsit (%95 SiO_2), demir-çelik hurdası veya demir cevheri ile metalurjik kok belirli oranlarda tartılarak karıştırıldıktan sonra fırına beslenir. Ferrosilisyum fırınında hammadde nakli ve tartımı bilgisayar otomasyonu ile yapılmaktadır. Demir oksitler ve SiO_2 karbon ile indirgenerek ferrosilisyum alaşımını oluşturur. Alaşım, fırın tabanında birikir. Biriken bu alaşım mal alma oluklarının uygun zaman aralıklarında açılmasıyla demir kalıplara alınır. Soğuyan bloklar kırılıp net 500 kg'lık sandıklarda satışa sunulur.

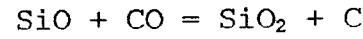
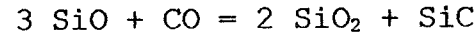
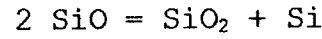
Ferrosilisyum üretiminde yer alan reaksiyonlar kısaca şöyledir (Uysal, 1993):



Fırına verilen karışım ($\text{SiO}_2 + \text{C}$) ısıtılırsa;



Fırın gazı soğutulduğu zaman (ortamda karbon yoksa);



Şekil 3.1'deki üretim aşamasının üst kısmında görüldüğü gibi, fırın bacasından çıkan ve torba filtrelerde toplanan dumanlar, silolarda birikir. Ferrosilisyum, demir-çelik endüstrisinde oksit giderici, korozyon direnci ve dayanım sağlayan alaşım elemanı olarak, silisyum saç ile yay çeliklerinin üretiminde kullanılır (Uysal, 1993).

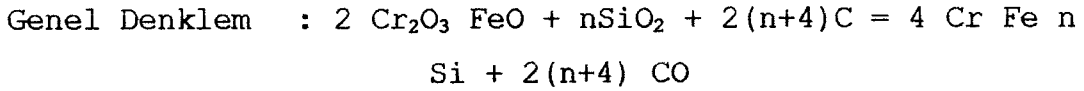
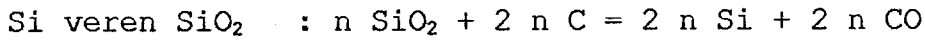
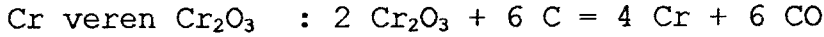
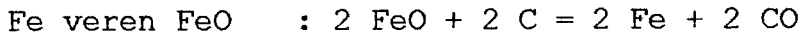
3.2.2. Silikoferrokrom tesisi ve üretim yöntemi

Silikoferrokrom tesisinin kuruluş tarihi 1960-1963 yılları arasında olup, kuruluş kapasitesi 6.400 Ton/Yıl'dır. 1993 yılında üretim kapasitesi 7.100 Ton/Yıl olarak gerçekleşmiştir.

7500 kVA'lık bir ark-direnç fırınına, %46.5 Cr_2O_3 ihtiva eden krom cevheri (roş kromit), kuvarsit, metalurjik kok hammadde silolarından tartılarak alınır ve bir karışım

halinde boksit gibi katkı maddelerinin ilavesi de gerekebilir. Bu fırın içerisinde demir oksitler, Cr_2O_3 ve SiO_2 indirgenerek oluşan SiFeCr alaşımı fırın tabanında birikir. İndirgenemeyen oksitler ile bir kısım SiO_2 metal yüzeyinde sıvı bir curuf tabakası oluşturur. Metal ve curuf uygun aralıklarla mal alma oluklarından alınarak birbirinden ayrılırlar. Curuf kalıplara dökülerek soğutulur ve atılır. Metal ise SiC parçacıklarının yüzeye çıkabilmesi için bir süre bekletilir veya dekarbürizasyon işlemine tabi tutulduktan sonra zengin curuf ile potalara aktarılarak siliko-termik reaksiyon sonucu elde edilecek ferrokrom için hazır hale getirilir.

Silikoferrokrom üretiminde yer alan reaksiyonlar kısaca şöyledir (Uysal, 1993):



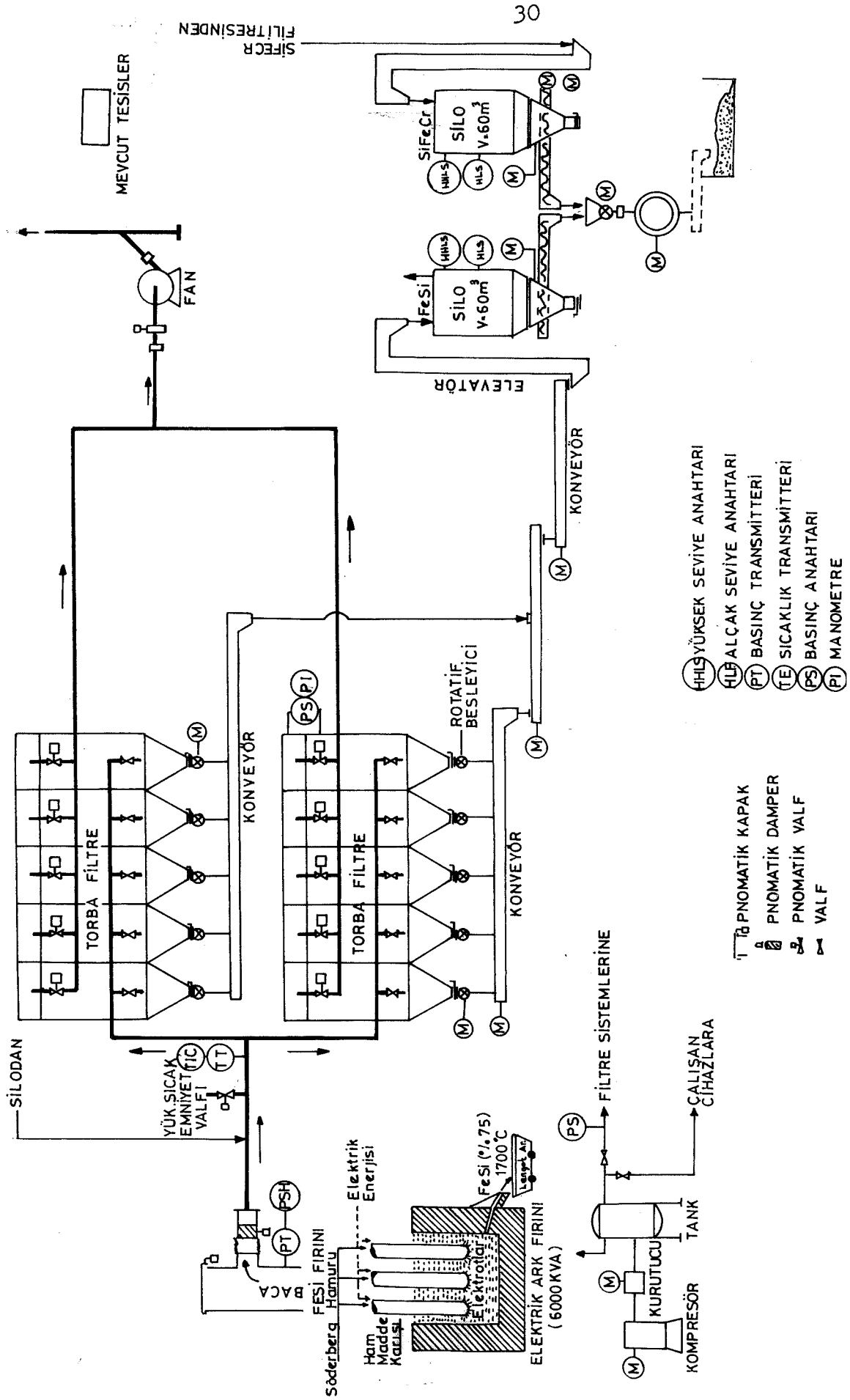
Şekil 3.2'deki üretim yöntemi ile elde edilen silikoferrokrom, kaliteli çelik üretiminde ve döküm endüstrisinde alaşım elemanı olarak kullanılmaktadır (Uysal, 1993).

3.3. Fiyat, Satış Şekli ve Üretim Kapasitesi

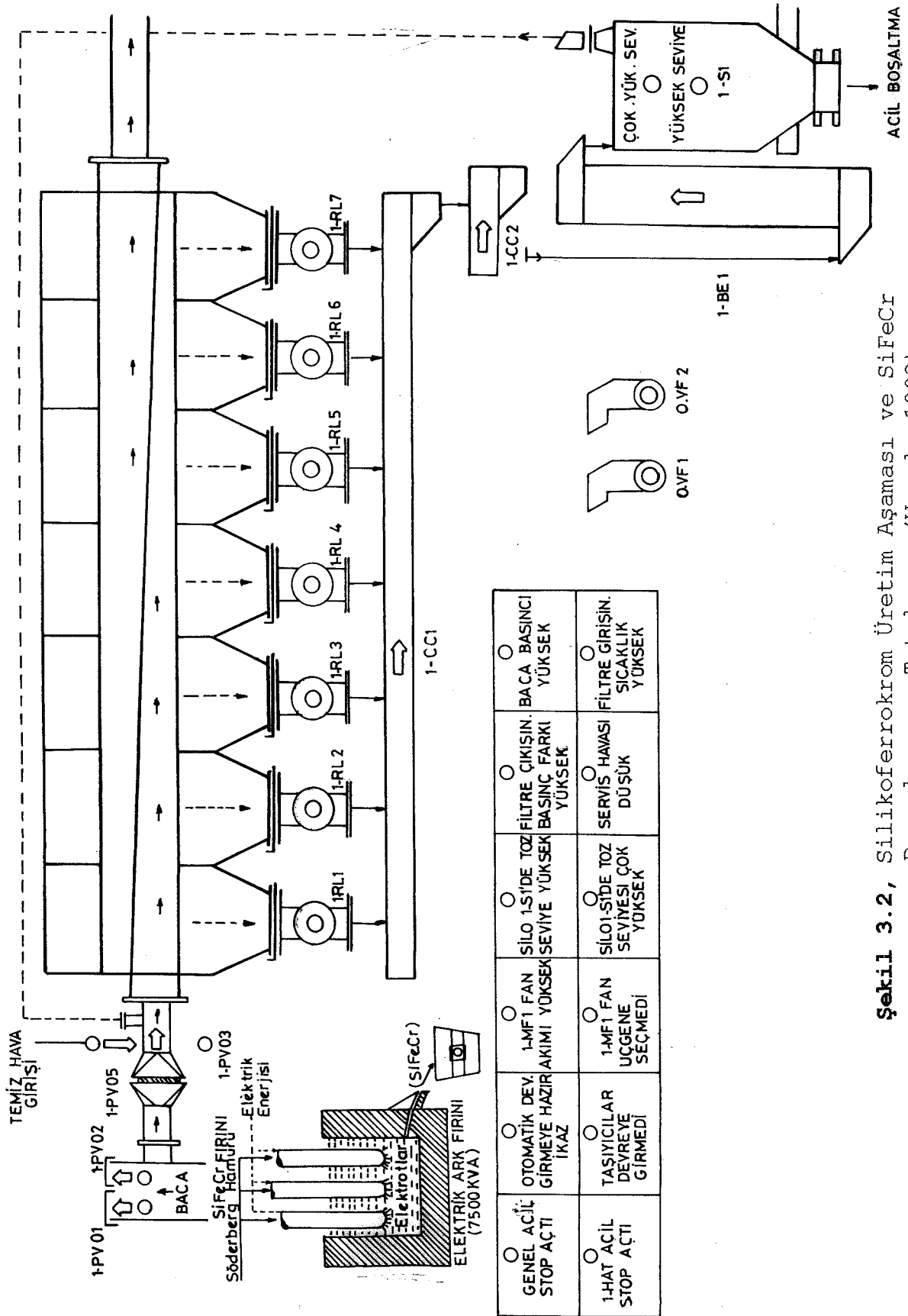
Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi tesislerinde elde edilen silis dumanlarının fiyat, satış şekli ve üretim kapasitelerinin 1993 yılına ait veriler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1, Silis Dumanlarının Fiyat, Satış Şekli
ve Üretim Kapasitesi (Uysal, 1993)

Silis Dumanı	Torba Ebadi (cm)	Torba Ağırlığı (kg)	Fiyatı (\$/Ton)	Üretim (Ton/Gün)	Üretim (Ton/Yıl)
FeSi	80x80x140	400	70.18	1.5	529.5
SiFeCr	80x80x140	300	46.60	1.5	529.5



Şekil 3.1, Ferrosilisyum Üretim Aşaması ve FeSi Dumanlarının Tutulması (Uysal, 1993)



Şekil 3.2, Silikoferrokrom Üretim Aşaması ve SiFeCr Dumanlarının Tutulması (Uysal, 1993)

4. ARAŞTIRMADA KULLANILAN MALZEME, PROGRAM ve YÖNTEM

4.1. Malzeme

4.1.1. Silis dumanı

Deneylerde Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesinden temin edilen FeSi ve SiFeCr silis dumanları (Fotograf 4.1) kullanılmıştır. Çoğunlukla küresel olan dumanları 0.1 mikron civarında ölçülen ortalama çapları ile çimento tanelerinden yaklaşık 100 kere daha küçüktürler. Bileşimindeki yüksek silis oranı bu dumanları aktif bir puzolan yapmakta, fakat çok fazla olan incelik belirli bir kıvam için gerekli su miktarını artırmaktadır (Yeğınobalı, 1993). FeSi ve SiFeCr dumanlarının kireç ve çimento ile yapılan aktivite deney sonuçları Tablo 6.5'de, fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları ise Tablo 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.



Fotograf 4.1, Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Tesislerinde Tutulan Silis Dumanları

4.1.2. Portland imentosu

Araştırmada, Elazığ Altınova imento Fabrikası A.ř.'nin üretmiş olduğu portland imentosu (P 32.5) kullanılmıştır. Çimentoların fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.1, imentonun değişik oranlarda silis dumanları ile kullanılması sonucu meydana gelen karmaşık bileşikler ise Tablo 4.2'de verilmiştir.

4.1.3. Karma suyu

Harç ve beton karma suyu olarak pH'ı 7.5 olan Elazığ şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Karma suyu olarak kullanılmadan önce suyun dinlenmesi ve $20\pm3^{\circ}\text{C}$ 'de olabilmesi için tam bir gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra kullanılmıştır.

4.1.4. Süper akışkanlaştırıcı katkı

Bazı beton karışımlarında kıvamı değiştirmeden su-bağlayıcı orantısını azaltabilmek amacı ile TS 3452'ye göre sınıfı AH olan süper akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı bir katkı maddesi (SA) kullanılmıştır.

4.1.5. Standard kum

Araştırmada yer alan harç karışımlarında TS 819'a uygun olarak, Pınarhisar imento Fabrikası tarafından hazırlanıp torbalanarak piyasaya sunulan "Standard Kum" kullanılmıştır.

Tablo 4.1, Deneylerde Kullanılan Çimento ve Silis Dumanlarının Özellikleri

	Çimento PÇ 32.5	Silis Dumanları	
	Elazığ	FeSi	SiFeCr
Kimyasal Bileşim (%)			
SiO ₂	20.42	94.62	81.40
Al ₂ O ₃	5.47	0.20	4.47
Fe ₂ O ₃	3.12	0.20	1.40
CaO	63.10	1.40	0.82
MgO	2.96	---	1.48
SO ₃	2.40	0.21	1.35
Kızdırma Kaybı	1.54	----	7.26
Tayin Edilemeyen	0.73	1.48	1.82
Çözülmez Kalıntı	0.26	2.16	----
Fiziksel Özellikler			
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.10	2.36	2.32
Özgül Yüzey (m ² /kg)	3493	----	----
Modüller (%)		Şartname Değeri	
Silika Modülü (SM)	2.37	1.2-4.0	
Hidrolik Modülü (HM)	2.17	1.7-2.2	
Alümin Modülü (AM)	1.75	1.0-4.0	
Kireç Doyma Faktörü			
KS (%)	93	90-98	
Çimentonun Ana Bileşenleri			
C ₃ S	53.64	----	----
C ₂ S	14.40	----	----
C ₃ A	9.21	----	----
C ₄ AF	9.49	----	----

Tablo 4.2, Çimento ve Silis Dumanlarının Kimyasal ve Karmaşık Bileşimleri

	Elazığ PÇ + FeSi					Elazığ PÇ + SiFeCr				
PÇ	%90	%85	%80	%75	%70	%90	%85	%80	%75	%70
SD	%10	%15	%20	%25	%30	%10	%15	%20	%25	%30
Kimyasal Bileşim (%)										
SiO ₂	27.8	31.5	36.2	39.0	42.7	26.5	29.5	32.6	35.6	38.7
Al ₂ O ₃	4.94	4.67	4.41	4.13	3.88	5.37	5.32	5.27	4.21	5.17
Fe ₂ O ₃	2.83	2.68	2.54	2.39	2.24	2.94	2.86	2.77	2.69	2.60
CaO	57.0	53.8	50.7	47.7	44.6	56.8	53.7	50.6	47.5	44.4
MgO	2.66	2.51	2.37	2.22	2.07	2.81	2.74	2.66	2.59	2.52
SO ₃	2.18	2.07	1.96	1.85	1.74	2.29	2.24	2.19	2.13	2.08
KK	1.38	1.31	1.23	1.15	1.07	2.11	2.40	2.68	2.97	3.25
TE	0.80	0.84	0.88	0.91	0.95	0.84	0.89	0.95	1.00	1.05
ÇK	0.45	0.54	0.64	0.73	0.83	0.23	0.22	0.20	0.19	0.18
Modüller (%)										
SM	3.58	4.28	5.22	5.98	6.97	3.19	3.61	4.05	5.15	4.98
AM	1.74	1.74	1.74	1.73	0.91	1.73	1.86	1.90	1.56	1.98
HM	1.60	1.38	1.18	1.03	0.91	1.63	1.42	1.24	1.11	0.95
KDF	0.67	0.56	0.47	0.41	0.35	0.69	0.58	0.51	0.45	0.38

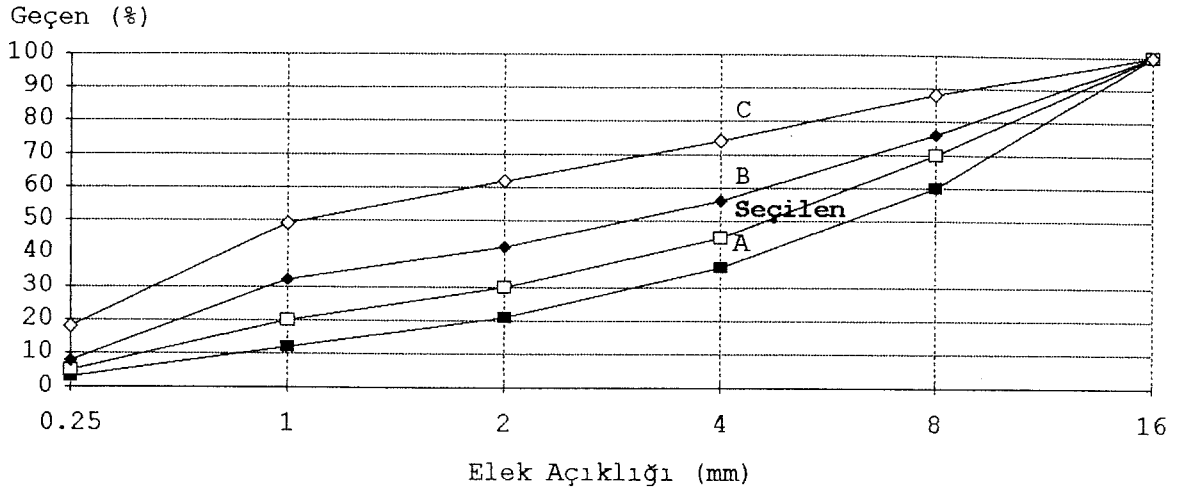
4.1.6. Agrega

Deneysel çalışmalarda, Elazığ Keban Holding A.Ş.'nin Elbeton Prefabrike Yapı Elemanları Üretim Fabrikası agrega tesislerinden alınmış olan Elazığ-Palu agregası (Fotagraf 4.2) kullanılmıştır. En büyük tane boyutu 16 mm'dir. Agreganın granülometri eğrisi Şekil 4.1'de, fiziksel özellikleri ise Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3, Deneylerde Kullanılan Agreganın Fiziksel Özellikleri

Agrega Tane Sınıfı	Birim Ağırlık (Sıkışık) (kg/m ³)	Özgöl Ağırlık (DKY) (g/cm ³)	Su Emme (%)	Mevcut Rutubet (%)	Aşınma (%) (Tüvenan)	
0-4.0 mm	1760	2.63	1.11	0.73	100 D	500 D
4.0-16.0 mm	1719	2.74	0.80	0.46	6.98	18.63

**Fotograf 4.2,** Elazığ-Palu Agregası



Şekil 4.1, Elazığ-Palu Agregası Granülometri Eğrisi

4.1.7. Su/Bağlayıcı oranı

Araştırmada, Su/Çimento ve/veya Su/Çimento+Silis Dumanı oranı Su/Bağlayıcı (S/B) olarak ifade edilmiştir.

Hamur karışımlarının S/B oranı için her bir karışım folw (yayılma) testine tabi tutulmuştur. Buna göre %105~115 yayılma oranı gösteren su miktarı üzerinden S/B oranı hesaplanmıştır. SA kullanılan karışımlarda S/B oranı 0.40 düzeyinde sabit tutulmuştur. Kullanılacak SA miktarı ise, PÇ, PÇ+FeSi ve PÇ+SiFeCr'lu karışımların yine flow teste göre S/B oranının 0.40 düzeyinde sabit kalmak şartı ile %105~115 yayılma oranı sağlayan miktar kadardır.

Beton numunelerin S/B oranlarının bulunması amacıyla "Çökme Hunisi Metodu" ile yaklaşık 80 mm. çökme sağlanan değer S/B oranı olarak alınmıştır. S/B oranı 0.40 düzeyinde tutulan karışımlarda SA kullanılarak yaklaşık 80 mm. çökme sağlanmıştır.

4.1.8. Karışım oranı ve hesabı

SA katkılı ve ketkısız harç ve beton numunelerinde çimentonun yerine (ağırlık sabit, hacim değişken) alınan FeSi ve SiFeCr oranları %10, 15, 20, 25 ve 30'dur. SA kullanılan numunelerde ise FeSi ve SiFeCr oranı %10, 15 ve 20'dir.

Beton numunelerinin karışım hesabı ACI 211 esasına göre yapılmıştır (Yeğinobalı, 1992). Burada çimento özgül ağırlığı: 3.10 g/cm^3 , çökme: 80 mm., D_{max} : 16 mm., f_{cm} : 30 MPa ve sıkışmış hava hatminen: %2-2.5'dir. Bu esasa göre elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'de, tüm betonlar için karışım oranları ise Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.4, Kontrol Beton Karışımı İçin Malzeme Miktarı

Malzeme Cinsi	kg/m ³
Karma Suyu	214
Çimento	400
İnce Agrega	810
İri Agrega	920
Toplam	2344

Tablo 4.5, Beton Karışımları

	S/B	PÇ (kg)	Karma Suyu (lt)	FeSi (kg)	SiFeCr (kg)	SA (kg)	Agrega (kg)	
							0-4	4-16
K	0.52	400	208	---	---	---	810	920
F10	0.54	360	216	40	---	---	810	920
F15	0.57	340	228	60	---	---	810	920
F20	0.60	320	240	80	---	---	810	920
F25	0.62	300	248	100	---	---	810	920
F30	0.65	280	260	120	---	---	810	920
S10	0.54	360	216	---	40	---	810	920
S15	0.57	340	228	---	60	---	810	920
S20	0.60	320	240	---	80	---	810	920
S25	0.62	300	248	---	100	---	810	920
S30	0.65	280	260	---	120	---	810	920
KA	0.40	400	160	---	---	1.44	810	920
F10A	0.40	360	160	40	---	1.64	810	920
F15A	0.40	340	160	60	---	1.88	810	920
F20A	0.40	320	160	80	---	2.08	810	920
S10A	0.40	360	160	---	40	1.68	810	920
S15A	0.40	340	160	---	60	1.84	810	920
S20A	0.40	320	160	---	80	1.92	810	920

4.1.9. Tartışma

Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi tesislerinde tutulan silis dumanları ile Tablo 2.1'de verilen gelişmiş bazı ülkelerde tutulan silis dumanlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri arasında bir benzerlik söz konusudur.

Deneylerde kullanılan PÇ'nin tipi, ana bileşen ve modülleri bakımından durumu şöyledir:

Tabii çimentolarda $HM=1.7-2.4$, yüksek alüminli çimentolar da ise $0.50-0.65$ civarındadır (Özdemir, 1973). HM 'nin, bu değerden çok yüksek olması durumunda, prizini tamamlamış çimentolarda, betonun tahribine yol açan kuvvetli bir hacim genleşmesi beklenir. HM 'nin söz konusu değerden

çok küçük olması durumunda ise, harcın ufalanması, sulanması ve sonunda dağılması beklenir (Özdemir, 1973; Aktuna, (?)).

Akman'a (1987) göre, HM, 1.8-2.2 arasında bir değer alır. Düşük değer alması çimentonun bağlayıcılık niteliğinin üstün olduğunu gösterir.

HM konusunda iki farklı görüş bulunmakla beraber Michaelis'in görüşünün doğru olduğu düşünülmektedir. Deneylerde kullanılan PÇ'nin HM'si, Tablo 4.1'de de görüleceği üzere, 2.17 çıkmıştır. Buna göre; yapılan hacim sabitliği deneylerinde anormal bir hacim genleşmesi ile karşılaşılmamıştır. Ayrıca, hamur, harç ve beton numunelerinde herhangi bir ufalanma, dağılma veya numunelerin sulanması şeklinde bir durumla da karşılaşılmamıştır.

Kireç bakımından zengin olan çimentolar az olanlara göre daha yüksek dayanım sağlarlar. Bu nedenle PÇ'de kireç miktarını imkanlar ölçüsünde yüksek tutmak gerekmektedir. İlk dayanımı yüksek olan çimentolarda KS %95-98 arasında değişir (Özdemir, 1973; Aktuna, (?)).

Akman'a (1987) göre, KS %90-95 arasında olması iyidir. Değer yüksekse birleşimde C₃S fazla olur. Ancak, tüm kirecin bağlanmaması ve serbest kireç miktarının fazla olması sakıncası doğar.

Deneylerde kullanılan PÇ'nin KS %93 çıkmıştır. Bu sonuç, kullanılan PÇ'nin ilk dayanımı yüksek olan çimento türü olmadığı sonucunu vermiştir.

Deneylerde kullanılan PÇ'nin C₃S %53.64 çıkmıştır. ASTM C150'ye (1992) Cordon'a (1979) ve Yeğioğlu'ya (1992) göre, ilk dayanımı yüksek olan çimentolarda C₃S miktarı %60'dır. Buna göre; deneylerde kullanılan söz konusu PÇ'nin, Tablo 4.1'deki verilerine göre, Tip I çimentosu olduğu anlaşılmıştır.

Akman'a (1987) göre, SM=2.2-2.6, AM=1.5-2.0 arasında olmalıdır. SM değeri büyükse bağlanamayan SiO₂ (yani

bağlayıcı niteliği olmayan silis) fazla olur. AM ise, sülfata dayanıklılığın bir göstergesidir.

Deneylerde kullanılan PÇ'nin $SM=2.37$ ve $AM=1.75$ çıkmıştır. Her iki değer, Kühl'ün ve Akman'nın öne sürdüğü değerlerle benzerlik göstermektedir.

SD katkılı çimentolara gelince durum şöyledir:

SD katkılı çimentoların hemen hepsinde $HM=1.8$ değerinden küçüktür. HM'nin düşük çıkması durumunda harcın ufalanması, sulanması ve sonunda dağılma beklenilmektedir. Fakat, deney kapsamındaki hamur, harç ve beton numunelerin hiçbirinde böyle bir durum ile karşılaşılmamıştır.

SD katkılı çimentoların hiçbirinde KS olan %90-95 değeri elde edilememiştir. Bu sonuç, SD katkılı çimentolarda C_3S miktarının düşük olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, tüm kirecin bağlanmaması ve serbest kirecin fazla olması gibi sakıncalı yönü bulunmadığını ifade etmektedir.

Silis dumanlarındaki yüksek SiO_2 katkılı çimentoların SM değerlerinin daha yüksek olmasına neden olmuştur. Çimentoda SM'nin büyük değerler alması ise reaksiyona girmemiş ve bağlayıcı niteliği olmayan fazla SiO_2 'nin bulunması anlamına gelir. Bu durumda, fazla SiO_2 'ler kompasite ve geçirimsizliği yükseltir.

Çimentolarda AM'nin 1.0-4.04 arasında bir değer alması istenir. Tablo 4.2'deki SD katkılı çimentolarda AM değeri ise, 1.56-1.98 (%30 FeSi katkılı hariç) arasında çıkmıştır. Bu verilere göre, SD katkılı çimentoların sülfatlara dayanıklı olabileceğini göstermektedir. Bu hususu, harçlarda sülfatın boy değişimine etkisi ve betonlarda zararlı kimyasallara dayanıklılık deney sonuçları da doğrulamaktadır.

4.2. Program ve Yöntem

Araştırmanın amacı doğrultusunda, Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi silis dumanlarının; taze ve sertleşmiş hamur, harç ve beton özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Araştırmada, silis dumanlarının sertleşmiş beton üzerindeki etkileri konusu daha yoğun olarak incelenmiştir.

Harç numunelerinde S/B oranının flow test, betonlarda ise çökme hunisi metodu ile bulunması kararlaştırılmıştır. Benzer şekilde S/B oranı 0.40 düzeyinde sabit tutulması düşünülen (80 mm. çökme değerini sağlayan) betonlarda SA kullanılması öngörülmüştür.

SA katkılı numunelerde %10, 15 ve 20, katkısızlarda ise %10, 15, 20, 25 ve 30 oranında silis dumanının kullanılması esas alınmıştır. Tüm karışımlarda FeSi ve SiFeCr silis dumanları çimento ağırlığının bir kısmı yerine (ağırlık sabit, hacim değişken) kullanılmıştır.

Araştırma programı Tablo 4.6'da özetlenmiştir. Tabloda görüleceği gibi deney yöntemlerinde genellikle standard yöntemler izlenmiş, kullanılan diğer yöntemlerde ilgili bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Belirli bir özellik için karışımlar ve deney numuneleri en kısa sürede hazırlanmış, laboratuvar şartları, zaman ve insan faktörlerinin sonuçları değiştirecek etkilerinin bütün karışımlar için değişmez tutulmasına çalışılmıştır. Her deney için hazırlanan numune sayısı ise Tablo 4.6'da belirtilmiştir.

Tablo 4.6, Araştırma Programı

Araştırılan Özellik	Deney Yöntemi	Karışım Sayısı	Her Karışımdaki Numune Sayısı ve Boyutu
PÇ + SD İÇYAPI İNCELEMESİ			
X-Işını Difrak.	T.Ç.M.B	5	Özel kalıp x 6
DTA Grafikleri	T.Ç.M.B	5	Özel kalıp x 6
AGREGA			
Birim Ağırlık	TS 3529	Standard	Her karışımdan 1 deneme
Özgül Ağırlık	TS 3526	Standard	Her karışımdan 1 deneme
Su Emme	TS 3526	Standard	Her karışımdan 1 deneme
Aşınma	TS 3694	Standard	Her karışımdan 1 deneme
Mevcut Rutubet	TS 3523	Standard	Her karışımdan 1 deneme
PÇ + SD TOZ KARIŞIMLARI			
Fiziksel Özel.	TS 24	3	Her karışımdan 1 deneme
Özgül Ağırlık	TS 639	3	Her karışımdan 2 deneme
Kimyasal Analiz	TS 687	3	Her karışımdan 1 deneme
HAMUR KARIŞIMLARI			
Kıvam	TS 24	18	Her karışımdan 1 deneme
Priz Süreler	TS 24	18	Her karışımdan 1 deneme
Hacim Sabitliği	TS 24	11	Her karışımdan 1 deneme
HARÇ KARIŞIMLARI			
Aktivite	TS 639 TS 25	5	Her karışımdan 1 deneme
Kıvam	TS 2848	18	Her karışımdan 2 deneme
Basınç Dayanımı	TS 24	18	4x4x16 cm Prizma Yarısı
Eğilme Dayanımı	TS 24	18	4x4x16 cm Prizma x 3
Sülfatın Boy Değişimine Etkisi	TS 3322 ASTM 490 ve 1012	18	25x25x285 mm Prizma Çubuğu x 6
TAZE ve SERTLEŞMİŞ BETON			
Kıvam	TS 2871	18	Her karışımdan 2 deneme
Birim Ağırlık	TS 2941	18	Her karışımdan 2 deneme
Basınç Dayanımı	TS 3323	18	10x10x10 cm Küp x 6
Donma-Çözülme Dayanımı	TS 3449 ASTM C 666 ve 310	18	10x10x10 cm Küp x 6
Sürtünme Yolu İle Aşınma Day.	TS 699 TS 2824	18	71x71x71 mm Küp x 6
Çarpma Dayanımı	ÖZEL	18	10x10x10 cm Küp x 6
Kuruma Rötresi ve Şişme	TS 3322 ASTM C 341	18	30x10x10 cm Prizma x (3+3)
Zarar.Kimya.Day	ÖZEL	18	10x10x10 cm Küp x 6
Betonların Bazı Temel Özellikle.	TS 3624	18	10x10x10 cm Küp x 6

5. SİLİS DUMANININ ÇİMENTONUN HİDRATASYONU ÜZERİNE ETKİSİ

5.1. Giriş

Çimentoyu oluşturan karmaşık bileşimlerin su ile yaptıkları reaksiyon sonucu hidrate bileşenler meydana gelmektedir. Yaklaşık 100 yıl önce Le Chatelier, klinkeri meydana getiren karmaşık bileşimlerin çimento içinde birbirinden bağımsız reaksiyonlar yaptığını ileri sürmüştür. Stenour, Bogue ve Lerch'in yapmış oldukları içyapı incelemeleri sonuçları Le Chatelier'in bu görüşünü doğrulamaktadır.

Tüm bu gelişmeler, çimento hidratasyonu ve reaksiyonların nasıl gelişmekte olduğunu saptama konusunda büyük kolaylıklar sağlamış ve bazı kesin sonuçlara varılabilmıştır. Bununla beraber, içyapı incelemesi tekniğinde önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen, özellikle hidrate bileşenlerin yapıları hakkında açık ve araştırmacının hemfikir olduğu bir sonuç elde edilememiştir.

Çimentoyu meydana getiren elemanlar, fırında birbirleriyle birleşmek suretiyle karmaşık bileşim denilen cisimler oluşur. Bu karmaşık bileşiklerin en önemlileri; SiO_2 'nin CaO ile birleşmesiyle meydana gelen kalsiyum silikatlar ve Al_2O_3 'ün yine CaO ile birleşerek oluşan kalsiyum alüminatlardır.

SiO_2 'nin CaO ile birleşmesi sonucu CS , C_3S_2 , C_2S ve C_3S gibi kalsiyum silikatlar; Al_2O_3 'ün CaO ile birleşmesi sonucunda da CA , C_3A , C_3A_5 ve C_5A_3 gibi kalsiyum alüminatlar meydana gelir.

Bu karmaşık bileşimlerden, en önemli olanlardan, C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF 'nin genel özellikleri kısaca şöyledir:

C_2S 'in 4 veya 5 alletropik hali bulunur ki bunları şu şekilde göstermek mümkündür:

Alletropik Hali	Kristal Şekli	Kararlı Durumu	Özgül Ağırlığı (g/cm ³)
$C_2S \alpha$	Hegzogonal	1500°C'nin altında	2.94
$C_2S \alpha'H$	Hegzogonal	1250°C'nin altında	3.11
$C_2S \alpha'L$	Hegzogonal	1000°C'nin altında	3.14
$C_2S \beta$	Monoklinik	650°C'nin altında	3.20
$C_2S \gamma$	Ortorombik	20°C'nin altında	2.94

Sıcaklık derecesinin azalmasıyla bileşikler $\alpha'H$, $\alpha'L$, β ve γ silikatına dönüşmektedir. Burada (α)'ların kristal yapılarının birbirine çok yakın olduğunu, atomların çok küçük halleriyle, bir kırılma meydana gelmeden bir halden diğerine iki yönde dönüşüm yaptığını belirtebiliriz. $C_2S \beta$ 'nin en önemli özeliği (γ) silikatına dönüşmesidir. Bu tek yönlü bir değişimdir. Bir başka değişle; (β), (γ) haline geçtikten sonra (γ)'nın tekrar (β) halini alması imkansızdır. Yukarıda verilen beş silikattan yalnız (γ) silikatının priz yapma özeliği yoktur. Bundan dolayı, klinker içinde (γ) silikatının fazla miktarda bulunmaması gerekmektedir. Bunun sağlanması için bazı öneriler sözkonusudur. Bunlardan birisi, (β) silikatının ani bir şekilde soğutulmasıdır. Bu konuda diğer çözüm yolu ise, ilkel maddeler arasında az miktarda B_2O_3 (Borik Oksit) veya Cr_2O_3 (Krom Oksit)'in karıştırılmasıdır.

(γ) silikatı dışında diğer silikat türlerinin priz yapması su ile bu madde arasında meydana gelen kimyasal

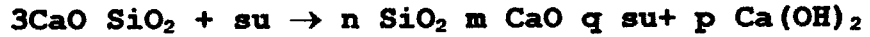
reaksiyon sonunda gerçekleşmektedir. Burada oluşan reaksiyon oldukça yavaştır. Bu durumun çimentonun özellikleri üzerinde son derece önemli etkileri vardır.

C_3S , çimentoların ve özellikle portland tipinin önemli ve en dinamik bileşiklerinden biridir. Bu cismin özgül ağırlığı 3.15 g/cm^3 'tür. 1900°C 'de ayrışmaya uğrayarak kireç ve C_2S ayrılır.



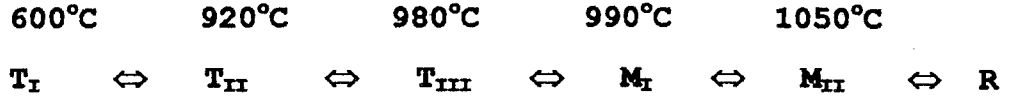
Bu ayrışma, daha düşük ısılarda da, kısmen olabilir. Bu durumda C_3S ve ayrışma ürünlerinden ibaret bir karışım meydana gelir. Bu cisim su ile karışınca C_2S ile birleşerek C_3S' i meydana getirir.

C_3S' 'in hidratasyon genel denklemi aşağıda verilmiş olup, denklemde yer alan ve birçok faktöre bağlı olan m, n, q ve p sayılarının değerleri henüz, kesin bir şekilde, bulunamamıştır.



$\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ sisteminde en önemli ve dinamik bileşik C_3A' 'dır. Bu cisim 1535°C 'de ergiyerek oluşan sıvıdan CaO ayrışır. Bundan dolayı, çimento yapımında, bu bileşimdeki karışımları ufaladıktan sonra 1375°C civarında uzun süre yeniden pişirmek gerekir.

Regourd ve Guineir'in yaptıkları bir araştırmaya göre; C_3S , oda sıcaklığı ile 1100°C arasında altı değişik alletropik şekilde kristal yapıya sahiptir. Bunları şu dönüşüm denklemleriyle göstermek mümkündür (Postacıoğlu, 1986).



Burada; (T) ile gösterilen silikatların kristal yapısı Triklirik, (M), Monoklinik, (R) ise, Romboedrik'tir.

C₃S meydana geldikten sonra, soğumaya bırakılması durumunda, 1050°C'de M_{II} silikası oluşmaktadır. Sıcaklık derecesinin azalmasıyla yukarıdaki denklemde gösterilen dönüşümler meydana gelir. Bu dönüşümlerin iki yönde olduğu yine yukarıdaki denklemden görülmektedir. Kristal yapıdaki bu değişiklikler atomların az miktarda hareketi sayesinde gerçekleşmektedir.

C₃S karmaşık bileşimin altı alletropik hallerinin her biri su ile hızlı bir şekilde gelişen bir kimyasal reaksiyon sonunda priz yapar. Alletropik hallerin su ile yaptıkları reaksiyonlarda bazı farklılıklar, kristal yapılarının değişik olmasından değil, kristal yapıda ki kusurlardan ileri gelmektedir.

Klinkerde ki trikalsiyum alüminat (C₃A), hacim merkezli kübik sistemde (C türü), ortorombik (O türü) ve tetragonal (T türü) şeklinde kristalleşir.

Portland çimentosunda yer alan bu alüminatın büyük bir reaktivitesi vardır. Bu özellik (Ca-O) bağıntısının düzensizliğinden ileri gelmektedir. Oksijen atomlarının distorsyonu ve Ca-O kısa bağlantılarının varlığı bir takım gerilmeler meydana getirir ve sistemin potansiyel enerjisini artırır. Çözelti haline geçişte bu enerji serbest hale geçmekte ve hidrasyon hızlı bir şekilde olmaktadır. Hidrasyonun başlamasıyla açığa çıkan fazla miktardaki ısı henüz reaksiyona katılmamış olan suyun buharlaşmasına neden olur. Suyun kaybolması ile hamur kuru bir hal alır ve reaksiyon için gerekli miktarda suyun

buharlaşmamasından dolayı başlayan priz olayı devam etmez. C_3A' 'nın fazla miktarda portland çimentosunda bulunması bu çimentoda sahte (yalancı) priz olayını meydana getirir. Böylelikle su karşısında priz yapmaya başlayan bağlayıcı madde hamuru bir süre sonra katılaşıcağına yumuşamaya başlar. C_3A' 'nın portland çimentosunda fazla miktarda bulunması bir takım zararlara yol açar.

C_3A' 'nın üç kristal türünden (C türü) diğerlerine göre daha hızlı bir şekilde hidrasyon yapar. Yine bu türde kristal yapılı C_3A' 'yı fazla miktarda içeren bir portland çimentosu deniz suyu etkisinde daha kolay zarar görür. C_3A' 'nın bir portland çimentosunda belli bir miktardan fazla bulunması prizin çok erken başlamasına neden olabilir. Sakıncalı olan bu durumun meydana gelmemesi için fırından çıkan klinkere ağırlığının %2-4 arasında $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (Alçı Taşı) ilave edilir ve birlikte öğütülür.

Yukarıda kısaca anlatılan $CaO-SiO_2$ ve $CaO-Al_2O_3$ 'ün ikişerli olarak birbirleriyle birleşmesi sonucu meydana gelen karmaşık bileşimlerdir. Pişirme sırasında iki eleman yerine üç elemenda birbiriyle birleşir. Bunlardan çimento teknolojisi bakımından en önemli olanlar; Fe_2O_3 'ün hem Al_2O_3 'le ve hemde CaO ile birleşmesiyle oluşan karmaşık bileşimlerdir.

Muhtelif metotlarla X-ışını difraktogramı, kimyasal ve termik analiz metotları uygulanarak yapılan çalışmalarda; Fe_2O_3 'ün hem Al_2O_3 ve CaO ile birleşmesi sonunda aşağıdaki iki karmaşık bileşimin meydana geldiği anlaşılmıştır.

Çimento teknolojisi açısından en önemsiz bileşik C_4AF' 'dir. C_4AF' 'in reaksiyonu C_6A_2F' 'nin reaksiyonuna oranla daha enerjik olmak üzere, C_3A' 'dan daha yavaştır. Bu nedenle, bu bileşimlerin varlığının sertleşmiş çimentonun dayanımı üzerinde büyük bir etkisi bulunmadığını belirtebiliriz.

Priz olayı esnasında ilk hidrate elemanlar alüminatlar tarafından meydana getirilmektedir. Bunların yapısı ince bir ağ şeklinde olup, buradaki boşluklar yavaş yavaş C-S-H tarafından doldurulmaktadır. Bu ağın yoğun olması durumunda sertleşme çok hızlı olmaktadır. Bunun içindir ki, PÇ'de C_3A 'nın, sınır değerlerde olması koşuluyla, mutlaka bulunması önerilmektedir.

Hidrate maddelerin özünü belirtmek için, cisim içinde ki suyun hangi türlerde bulunduğunun açıklamasında yarar vardır. Cisim içerisinde su; serbest, adsorbe, hidratasyon veya kristalleşme ve oluşma suyu şekilde bulunur.

Çimento hamurunda bulunan her bir tür suyun miktarı hidratasyon süreci boyunca değişmektedir. Sertleşmenin başlangıcında, suyun yaklaşık %50'si Van der Waals kuvvetleri ile çimento partiküllerine tespit edilmektedir. Çimento hamurunun ilk dayanımı bu adsorbe su ile olmaktadır. Zamanla hidratasyon ilerledikçe adsorbe suyun kalınlığı azalarak, hidratasyon ve oluşma suyu haline dönüşmektedir. Hidrate elemanları miktarlarının artması sonucu dayanım zamanla bir artış trendine girer (Postacıoğlu, 1986).

PÇ'nin yaklaşık %95'ini oluşturan karmaşık bileşimlerin hidratasyon yapmalarını sağlayan yaklaşık su miktarı: C_3S için gerekli su miktarı çimento ağırlığının %24, C_2S için %21, C_3A için %40 ve C_4AF için %37'si dir. Bu değerler çok güvenilir olmadığından, bunların kombine su miktarı hesabında esas alınması doğru değildir. Daha güvenilir bir metot ise, hidratasyon yapmış çimentolarda buharlaşmayan su miktarının saptanmasıdır. Belirli koşullar altında yapılan deneylerde bu tür su miktarının çimento ağırlığının %23'üne eşit alınabileceği anlaşılmıştır.

Sonuç olarak, çimentolarda hidratasyon olayı gelişiminin nasıl olduğu henüz kesin bir şekilde anlaşılamamıştır. Çimentoların prizi ekzotermik bir olay olup, hidratasyon olayının bir sonucudur. Portland çimentosunun içinde bulunan C_3S ile C_2S 'nin su karşısında

yaptıkları reaksiyonlar sonunda C-S-H ile bir miktar serbest kireç denilen Ca(OH)_2 'nin meydana geldiği bilinmektedir. Ca(OH)_2 suda kolay çözülerek zamanla betonun porozitesinin artmasına neden olur. Çimentoya karıştırılan puzolanlar serbest kireçle birleşmek suretiyle bu maddenin çözülmesini önlerler ve mukavemetini artırırılar.

5.2. X-Işını Difraktogramı

5.2.1. Giriş

Çimentonun erken ve sonraki dayanımları üzerine silis dumanlarının etkisini incelemek için, değişik oranlarda SD katılarak hazırlanan karışımların, değişik kür sürelerine ait X-ışını difraktogramı ile hidrasyon gelişimi izlenebilmiştir. X-ışını difraktogramında oluşan portlandit pikleri Ca(OH)_2 'in bağlanıp bağlanmadığı hakkında önemli fikirler vermektedir.

5.2.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

PÇ, FeSi ve SiFeCr dumanlarının X-ışını difraktogram çekimleri Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Laboratuvarları'nda yapılmış olup, deneye tabi tutulan numunelerin karışım oranları Tablo 5.1'de verilmiştir. Hazırlanan karışımlar özel plastik kalıplara konulduktan sonra hava ve rutubet geçirmeyecek şekilde ağızları sıkıca kapatılıp, oda sıcaklığında ve %90 rutubetli ortamda deney yaşına kadar korunmuştur.

Hidrasyonunu tamamlamış sertleşmiş hamur numuneleri X-ışını difraktogramlarında görülen portlandit piklerinin varlığı SD içeriğini gösterir. Tüm portlanditlerin C_3S ve C_2S 'in hidrasyonuyla oluşan ve SD ile birleşerek C-S-H'yi oluşturduğu gibi hatalı bir sonuca varmamak gerekir. Difraktogramlarda portlandit piklerinin eksikliği de onun

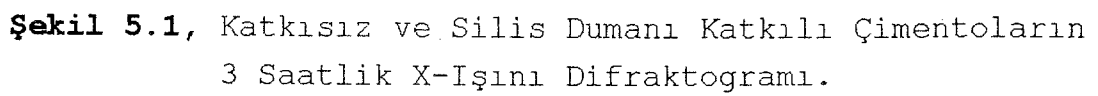
hiç olmadığı anlamına gelmediği gibi, bu olay, portlandit kristallerinin zayıf olarak kristalleştiği şeklinde açıklanmaktadır. Bu durumda, SEM fotoğraflarından yararlanılır.

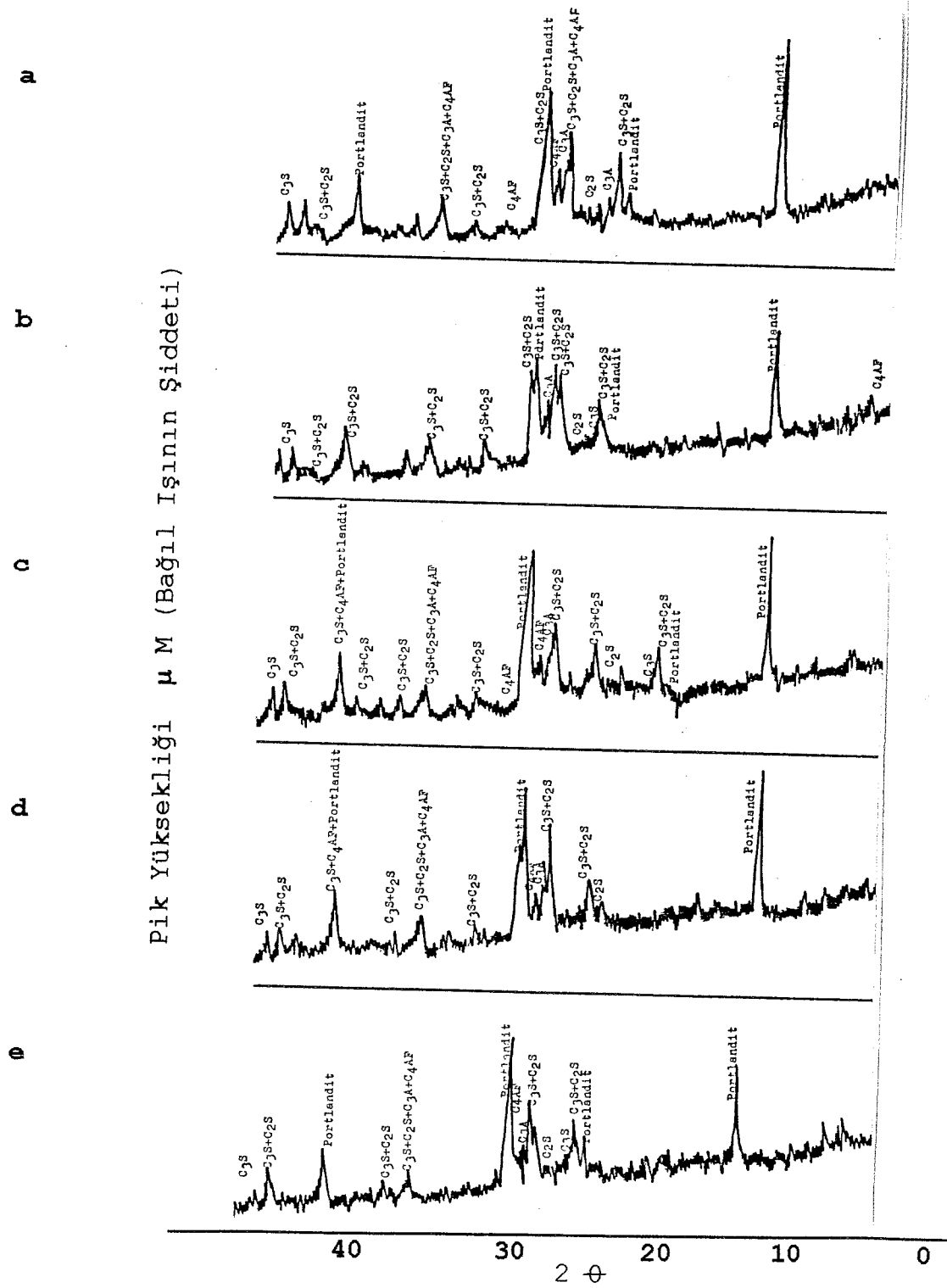
Deney yaşları 3. ve 24. saat, 3., 7., 28. ve 90. gün olup, her karışımdan 6 numune hazırlanmıştır. Elde edilen X-ışını difraktogramlarının 1/1 ölçeğinde verimesi durumunda grafiklerin çok büyük yer işgal edeceği düşüncesiyle küçültülmüş süretileri Şekil 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'da gösterilmiştir.

Difraktogramlarda; a: Katkısız, b:%10 FeSi, c:%20 FeSi, d:%10 SiFeCr ve e:%20 SiFeCr katkılı karışımları ifade etmektedir.

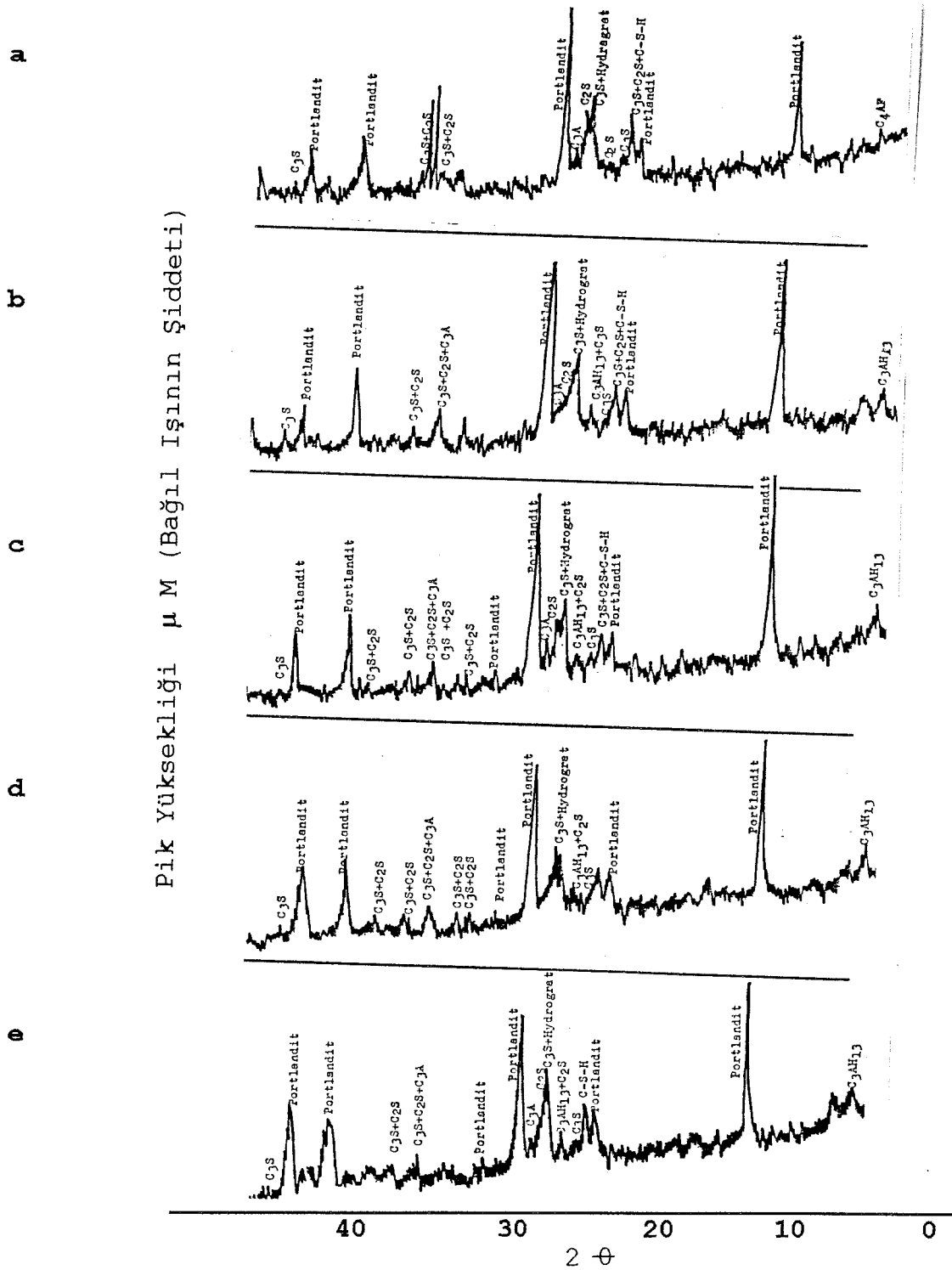
Tablo 5.1, X-Işını Difraktogram Deney Numunelerinin Karışım Oranları (g)

Karışımlar	PÇ	FeSi	SiFeCr	Karma Suyu
K	100	--	--	40
F10	90	10	--	40
F20	80	20	--	40
S10	90	--	10	40
S20	80	--	20	40

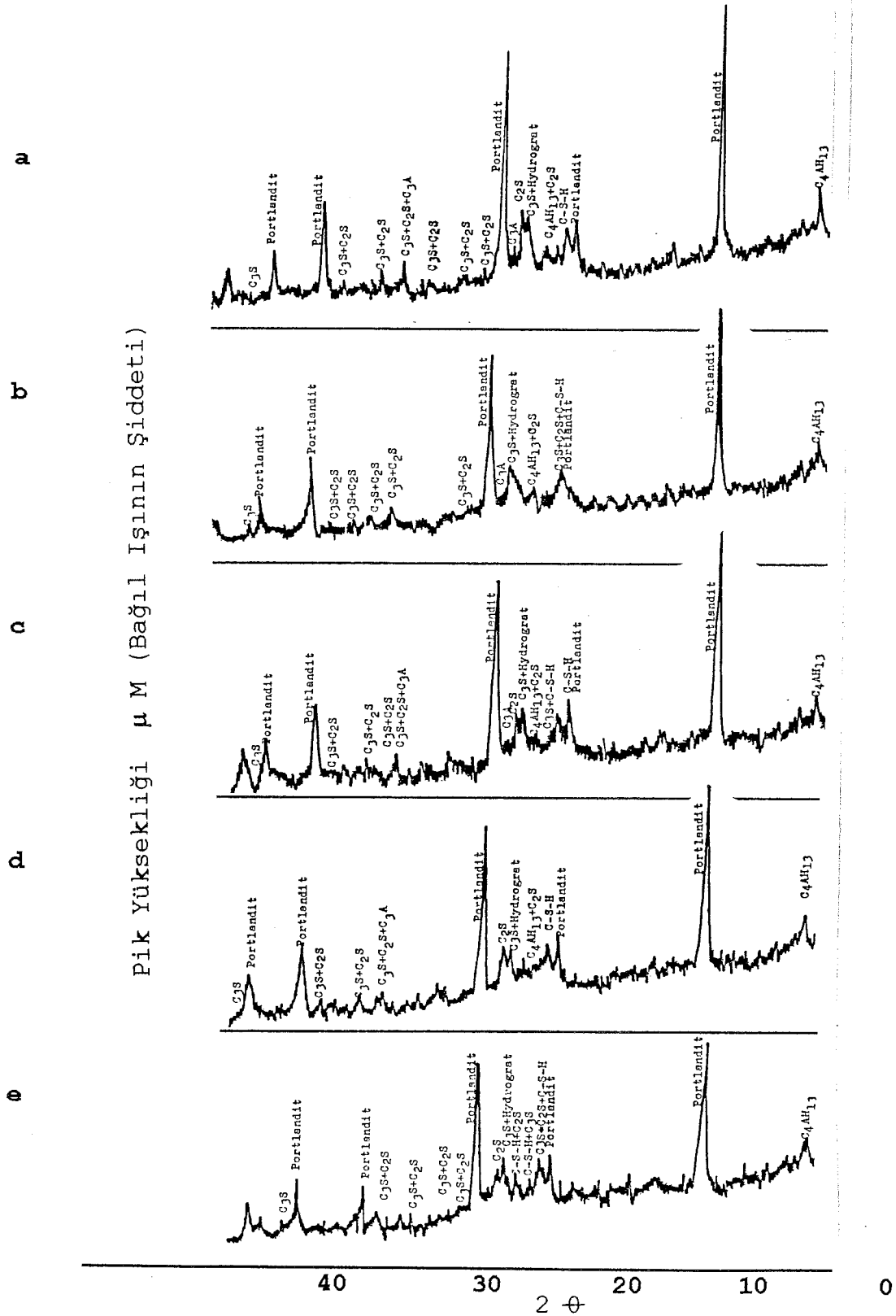




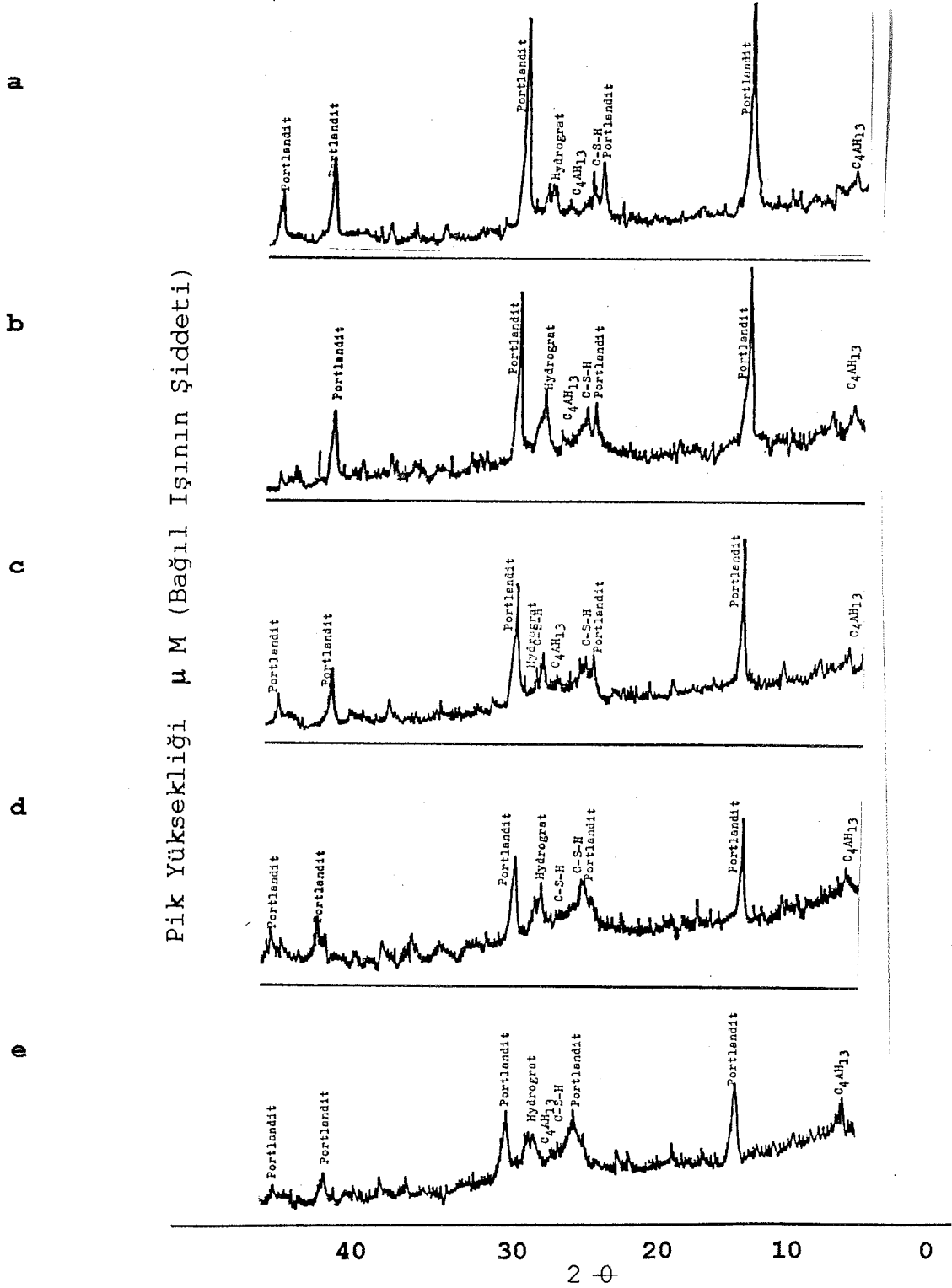
Şekil 5.2, Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 24 Saatlik X-Işını Difraktogramı.



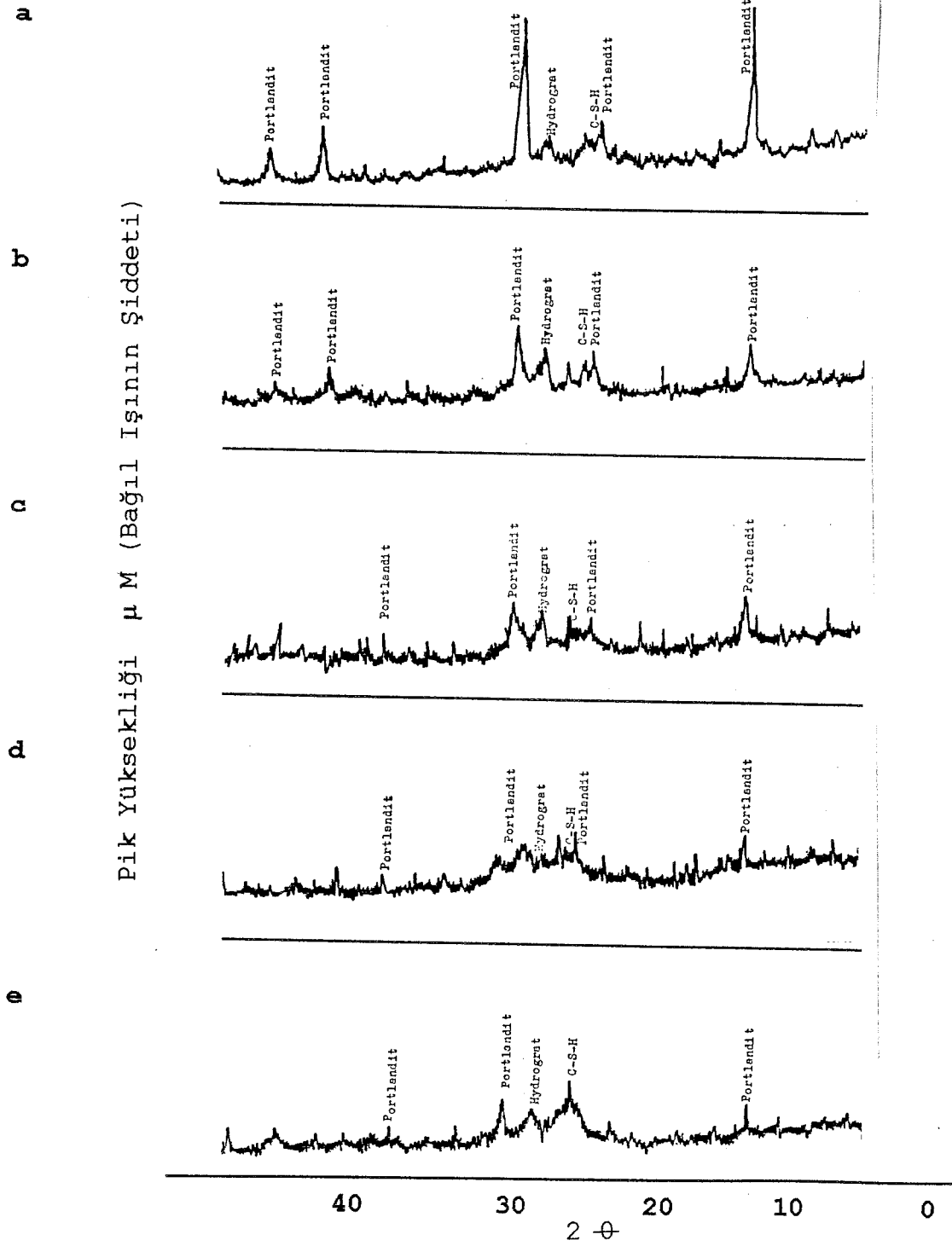
Şekil 5.3, Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 3 Günlük X-Işını Difraktogramı.



Şekil 5.4, Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 7 Günlük X-Işını Difraktogramı.



Şekil 5.5, Katkısız ve Silis Dumanlı Katkılı Çimentoların 28 Günlük X-Işını Difraktogramı.



Şekil 5.6, Katkısız ve Silis Dumanı Katkılı Çimentoların 90 Günlük X-Işını Difraktogramı.

5.2.3. Tartışma

Şekil 5.1'deki 3 saatlik katkısız ve silis dumanı katkılı çimento hamur karışımlarının hepsinde C_4AF oluşmuştur. C_4AF piki, silis dumanı oranı arttıkça nisbi bir azalma göstermektedir. Ayrıca, karışımların hiçbirinde etrenjit oluşmamıştır. Etrenjit'in görülmemesi, hiç oluşmadığı anlamına gelmez. Bu kristallerin çok az oluşması veya X-ışını difraktogramında görülmemiş olması şeklinde yorumlanabilir. FeSi ve SiFeCr karışım oranı arttıkça portlandit pik boyu küçülmektedir. C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF karışımların hemen hepsinde görülmüş olup, tobermorit SD oranı arttıkça piklerde de yükselme söz konusudur. Tobermorit piki çimentonun reaksiyonunda olması istenen bir özelliktir.

Şekil 5.2'deki, 24 saatlik karışımların hiçbirinde etrenjit görülmemiştir. SD oranı arttıkça portlandit pik boyu düşüşe devam etmektedir. Portlandit pikinin katkısız çimentoya nazaran, SD katkılı çimentolarda çok daha küçük olmasının nedeni, silis dumanlarındaki aktif olan SiO_2 'nin $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girip puzolanik reaksiyona göre hidrate kalsiyum silikatlar oluşturarak $Ca(OH)_2$ tüketimini hızlandırmasıdır. Yani, $Ca(OH)_2$, SD ile bağlanmaktadır. Bu olay özellikle %20 SD katkılı çimentolarda daha belirgindir.

Şekil 5.3'deki 3 günlük karışımların hiçbirinde etrenjit görülmemiştir. Fakat, 3 saatlik karışımların başlangıcında görülen C_4AF piki, C_3AH_3 (hidrate olmuş kalsiyum alüminat) piki şekline dönüşmüştür. FeSi ve SiFeCr karışım oranı arttıkça portlandit pik boyu düşüş halindedir. Portlandit pik boylarının giderek azalması FeSi ve SiFeCr dumanlarının oluşan $Ca(OH)_2$ 'nin bağlanmasına neden olmuştur şeklinde açıklanabilir. C_3A ve C_4AF pikleri oldukça küçük kalmıştır.

Şekil 5.4'deki 7 günlük karışımların hiçbirinde etrenjit görülmemiştir. Fakat, 3 saatlik karışımların başlangıcında görülen C_4AF piki, C_3AH_{13} piki şekline dönüşmüş şekliyle tekrar oluşmuş ve pik boyunda nisbi bir artış olmuştur. C_3S , C_2S ve C_3A karışımların hemen hepsinde oluşmaktadır. SD çimentolarda C_3S piki oldukça küçük kalmış ve portlandit piki yükselmeye başlamıştır. 3. gün hidratasyon gelişiminde olduğu gibi 7. gün sonunda da hydrograt pikinin olduğu yerde C_3S piki de oluşmuş ve SD oranı arttıkça pik boyunda bir düşüş gözlenmiştir.

Şekil 5.5'deki 28 günlük karışımların hiçbirinde yine etrenjit görülmemiştir. 3 saatlik karışımların başlangıcında görülen C_4AF piki, C_3AH_{13} piki tekrar oluşmuş fakat, pik boyunda bir artış olmamıştır. SD karışım oranı arttıkça portlandit pikinde 7. güne göre bir düşüş vardır. Daha önceki difraktogramında görülen C_3S , C_2S , C_3A ve portlandit piki hydrograt piki şekline dönüşmüştür.

Şekil 5.6'daki 90 günlük karışımların hiçbirinde daha önce görülen C_3AH_{13} piki oluşmamıştır. Katkısız çimentoda ki C-S-H bileşiğinin oluşumuna ait pik boyu SD katkılı çimentolardakine oranla çok daha küçük olup bu fark karışım oranı arttıkça büyümektedir. Bu olay, silis dumanı katkılı çimentolarda, erken yaşlarda olduğu gibi C-S-H oluşumunun daha süratli olduğunu gösterir. Portlandit pikindeki düşme daha da devam etmiş olup, %20 SD katkılı çimentolarda C-S-H oluşumu çok nettir. Daha önceki difraktogramında görülen C_3S , C_2S ve C_3A pikleri portlandit pikine ve C_3S +hydrograt piki ise hydrograt piki şeklinde oluşmaya devam etmiş olup, pik boyunda önemli ölçüde düşüş gözlenmiştir. 90. gün sonunda K numunesinde C-S-H gelişimi çok azdır.

Sonuç olarak, katkılı ve katkısız çimentoların hiçbirinde hidrate olmuş trikalsiyum sülfoalüminat oluşmamakta olup, hydrograt pikinin varlığı ise uzman kişilerce de açıklanamamaktadır. $Ca(OH)_2$ pikleri özellikle

28. günden sonra çok az bir pik oluşturabilmektedir. Reaksiyonun ilk dönemlerinde sıkça görülen bu pikler zamanla SD tarafından bağlanamayan Ca(OH)_2 çok küçük pik oluşturmıştır. Katkısız çimentonun 90 günlük difraktogramında halen bağlanamayan Ca(OH)_2 bulunmaktadır. Serbest haldeki Ca(OH)_2 harç ve betonun birçok özeliğini olumsuz yönde etkileyebilecektir.

5.3. Differansiyel Termal Analiz Grafikleri

5.3.1. Giriş

Differansiyel termal analiz (DTA) grafikleri, deney numunelerinin kimyasal reaksiyon süresince yapmış oldukları endotermik ve ekzotermik olaylar ile ağırlık değişimleri hakkında genel bir fikir vermektedir.

Ağırlık değişimi (TGA), ağırlık kaybı şeklinde olup numunelerin hidratasyonları sırasında meydana gelmektedir. Bu değişim kaba ve ince ağırlık değişimi olarak iki değişik yaklaşımla belirlenmektedir. İnce ağırlık değişimi, kaba ağırlık değişimine göre daha hassas sonuç vermektedir. Endotermik ve ekzotermik olaylar ise, deney numunelerinin reaksiyonu sırasında ısı alması veya ısı vermesi konusunda genel bir fikir vermektedir.

5.3.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Bölüm 5.2.2'de belirtilen esaslar dahilinde hazırlanan numuneler DTA cihazında, 5.4.1'deki esaslar doğrultusunda, 1000°C 'ye kadar ısıtılarak ve ($10^\circ\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızıyla) kaba (TG1) ve ince (TG2) ağırlık kaybı eğrileri üst üste getirilerek incelenmiştir.

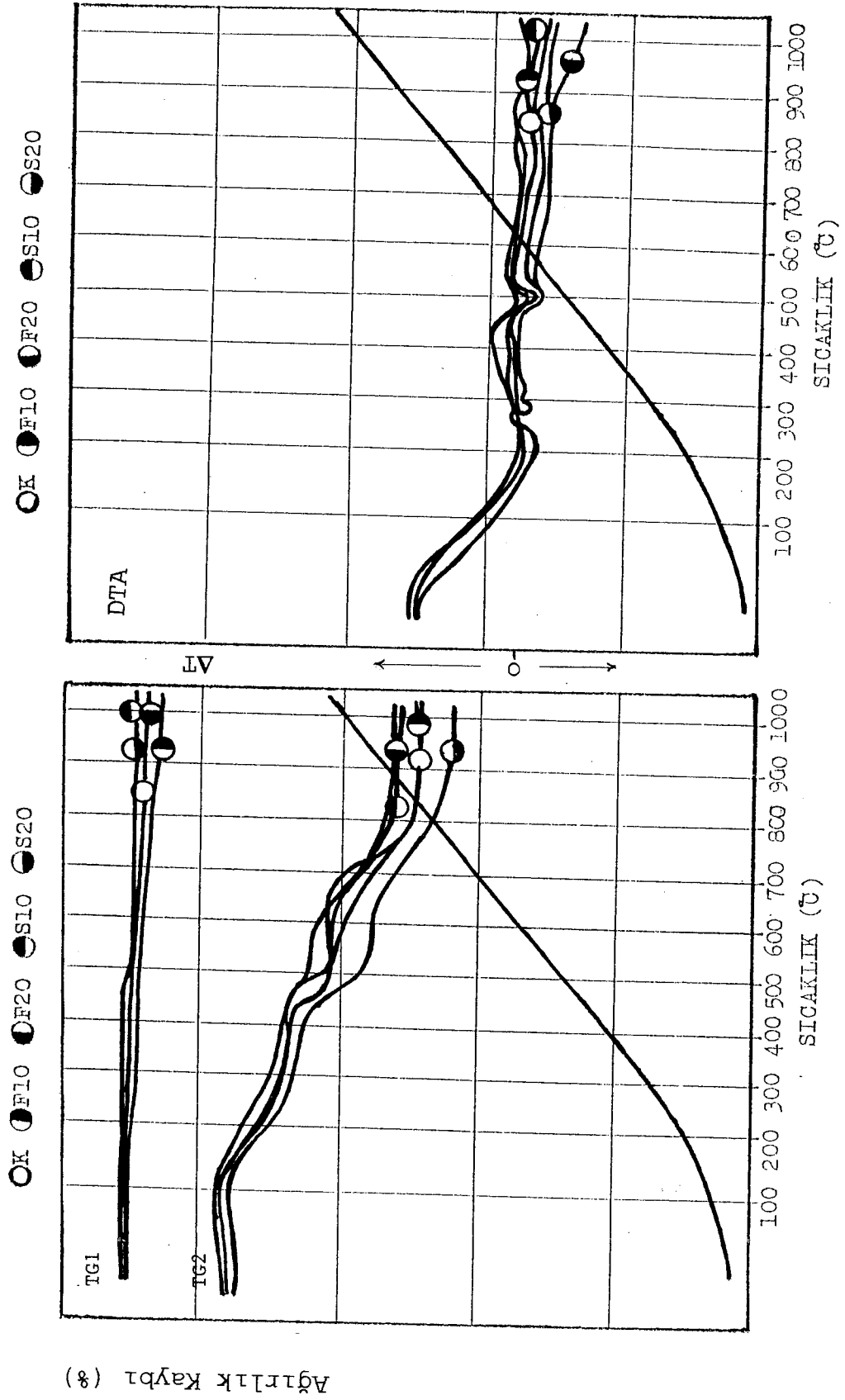
Katkısız ve %10, %20 SD katkılı çimento numunelerinin 3., 24. saat, 3., 7., 28. ve 90. günlük DTA grafikleri

Türkiye Çimento Müstahsileri Birliği Laboratuvarları'nda çekilmiş olup, konu ile ilgili yapılan çalışmada elde edilen grafikler Şekil 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 ve 5.11'de verilmiştir.

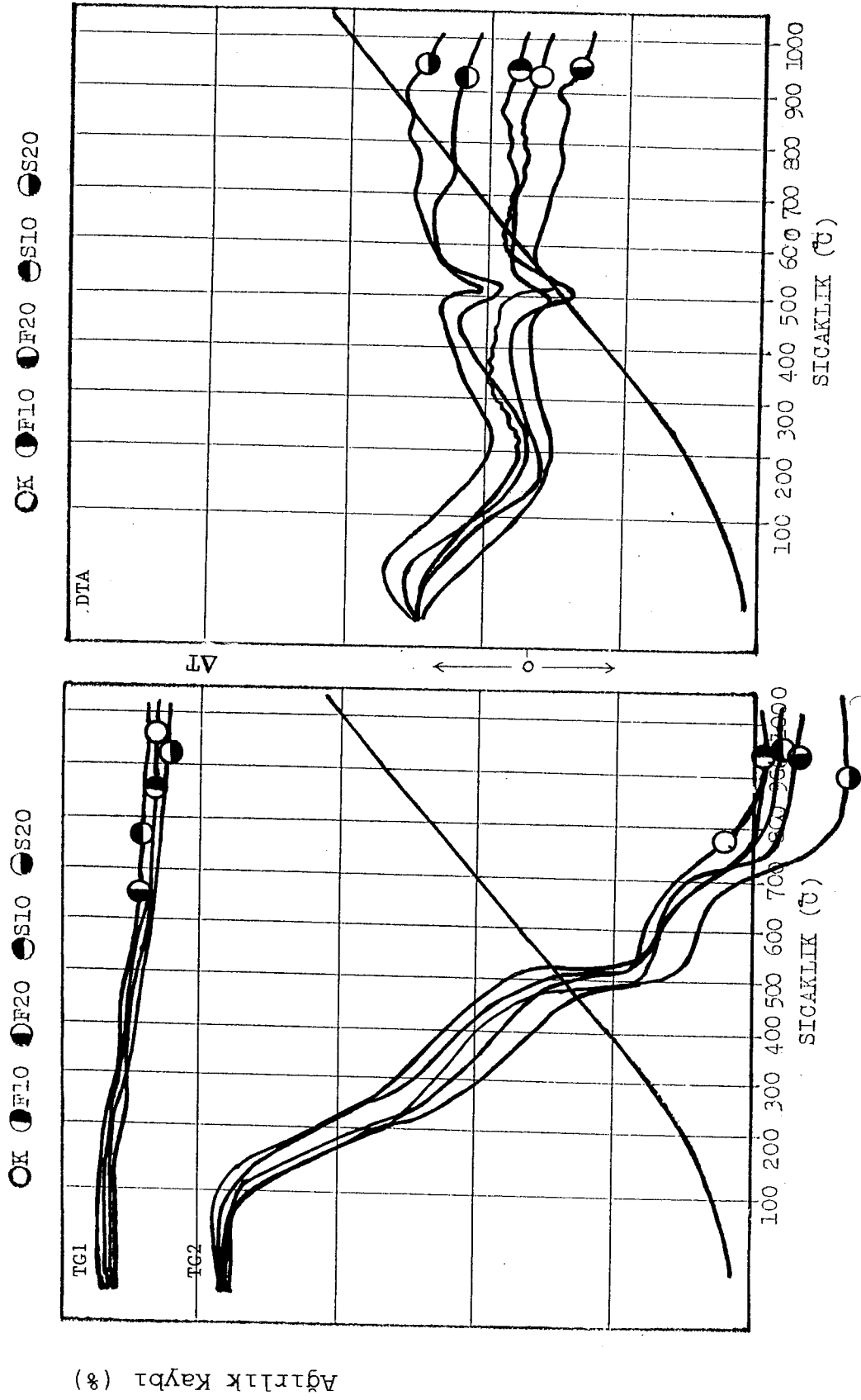
Grafiklerin 1/1 ölçeğinde verilmesi durumunda çok büyük yer işgal edeceği düşüncesiyle fotokopi ile küçültülmüş sürelerinin verilmesi öngörülmüştür.

DTA ve TGA grafiklerinin çekilmesinde kullanılan cihazın özellikleri şöyledir:

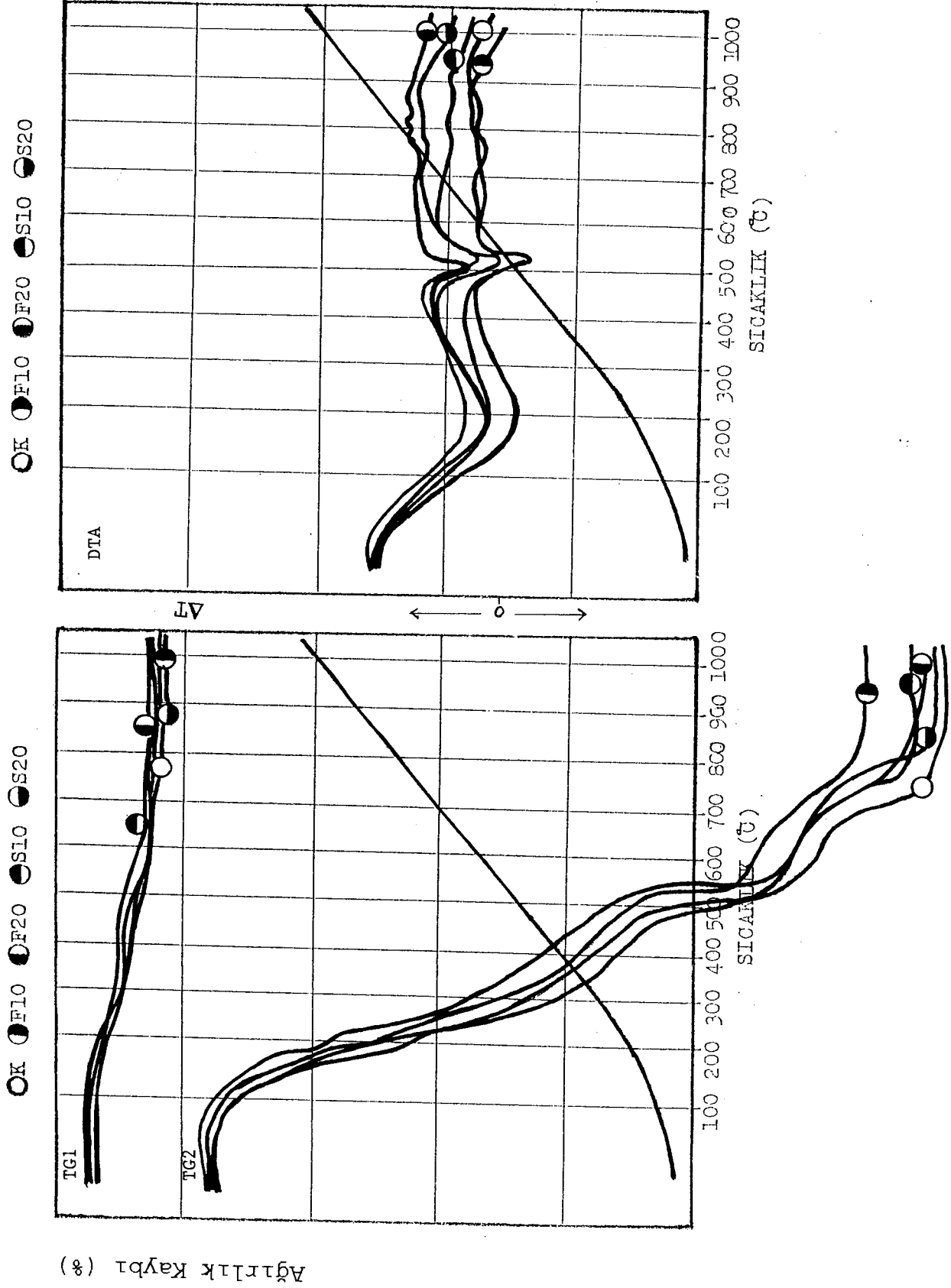
Cihaz	: Simultane Thermo Analit
Kroze	: Al_2O_3
Numune Taşıyıcı	
Sistem	: Pt/Rh-Pt
Program	: Isıtma Programı
Numune Ağırlığı:	100 g.
Kağıt Hızı	: 5 mm/saat
Rate	: 10°C/dakika
Ca(OH) ₂ 'nin	
Ayrışması	: 500°C'nin altındaki endotermik pik



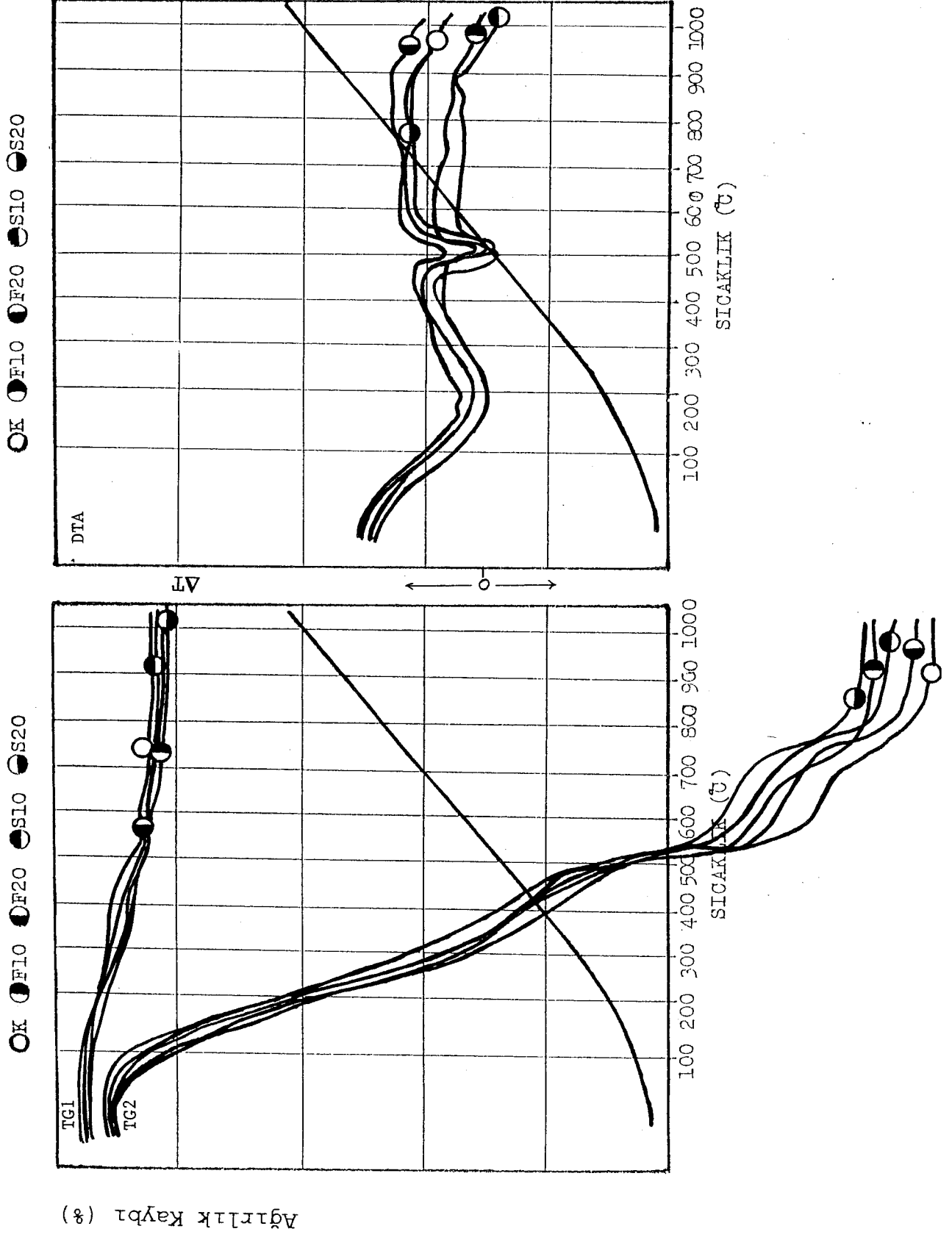
Şekil 5.7, Katkısız ve SD Katkılı Çimentoların 3 Saatlik
DTA ve TGA Grafikleri



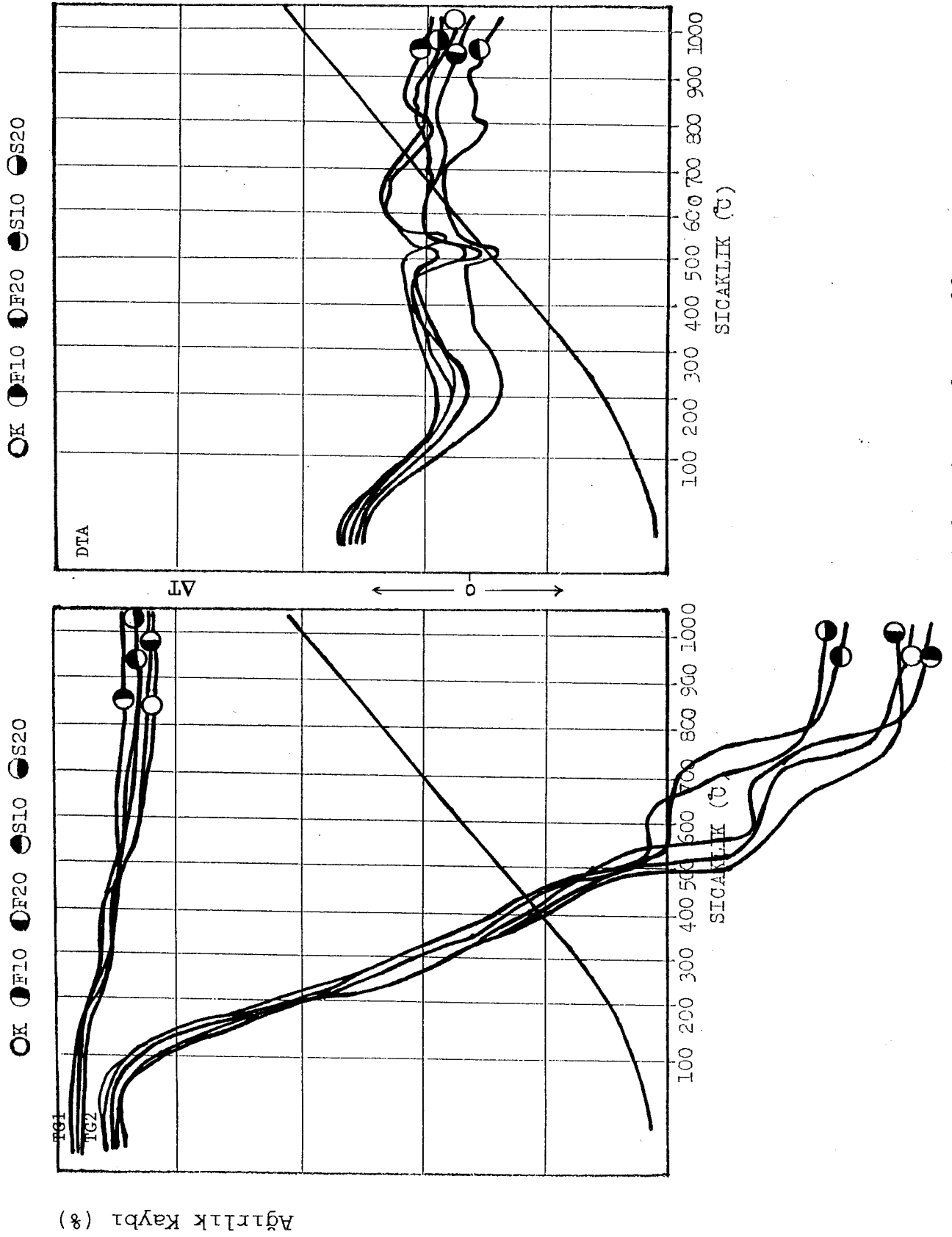
Şekil 5.8, Katkısız ve SD Katkılı Çimentoların 24 Saatlik DTA ve TG Grafikleri



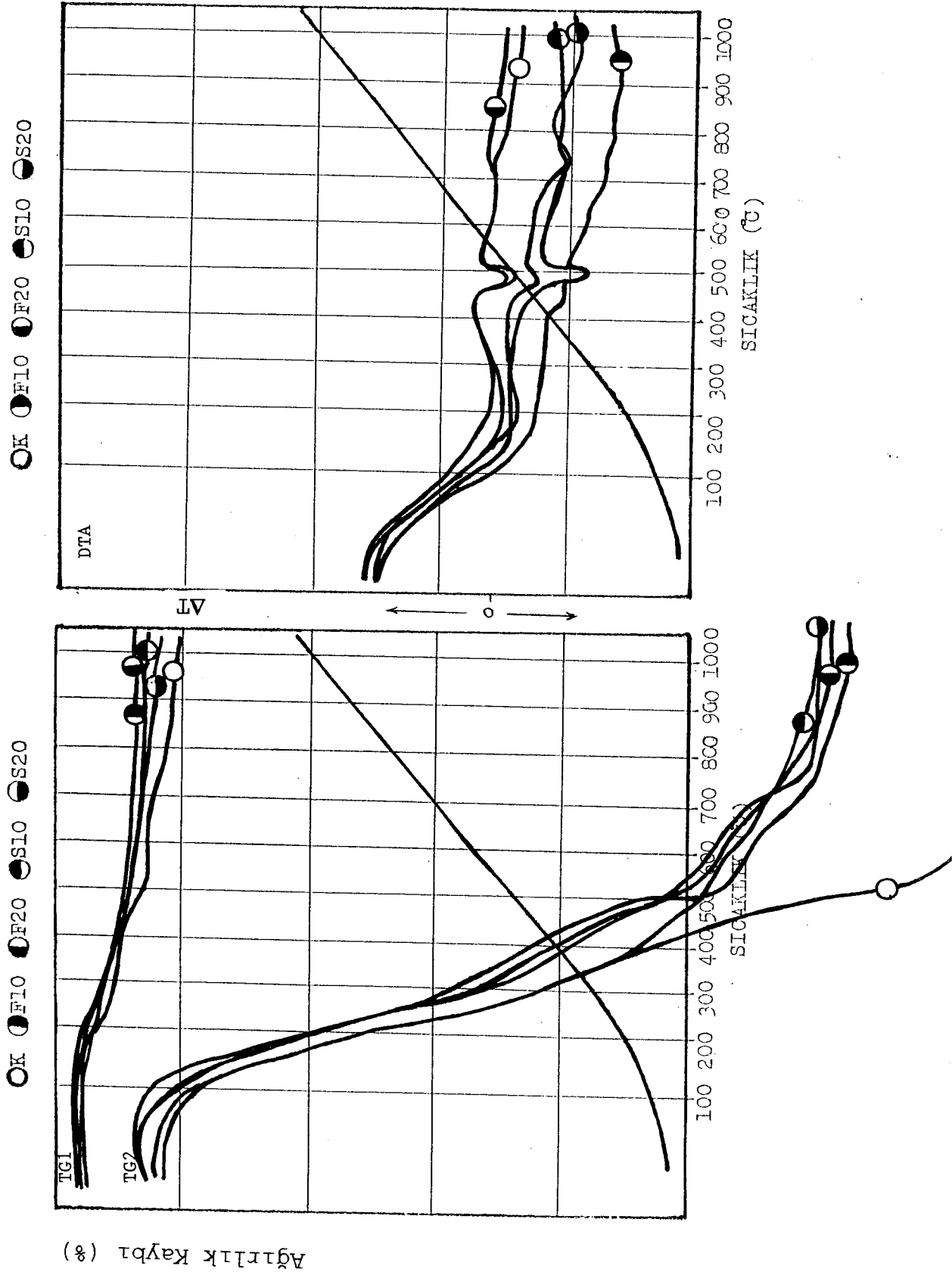
Şekil 5.9, Katkısız ve SD Katkılı Çimentoların 3 Günlük
DTA ve TGA Grafikleri



Şekil 5.10, Katkısız ve SD Katkılı Çimentoların 7 Günlük
DTA ve TGA Grafikleri



Şekil 5.11, Katkısız ve SD Katkılı Çimentoların 28
Günlük DTA ve TGA Grafikleri



Şekil 5.12, Katkısız ve SD Katkılı Çimentoların 90
Günlük DTA ve TGA Grafikleri

5.3.3. Tartışma

DTA grafiklerinin hemen hepsinde $\sim 500^{\circ}\text{C}$ 'de gözlenen endotermik pik, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin dekompoze olduğu reaksiyonları göstermektedir. Benzer şekilde, $\sim 180\text{--}200^{\circ}\text{C}$ civarındaki geniş endotermik olay ve bir anda meydana gelen ağırlık kaybı, hidrate olmuş kalsiyum silikat jellerinin, su kayıpları ile ilgilidir.

Birbirleri ile kıyaslanabilmesi için, ortak nokta $\sim 200^{\circ}\text{C}$ 'lerden sonra kısmen benzer davranışlarla reaksiyona girmeleri ve saçaklanmalarıdır. $\sim 180^{\circ}\text{C}$ sıcaklığın (y) eksenindeki karşılığı sıfır (0) kabul edilerek, numunelerin inert madde ile olan ΔT sıcaklık farkı veya reaksiyon farkı yorumlanabilmiştir.

Araştırma kapsamına alınan deney numunelerinin DTA grafikleri incelendiğinde; 3 saatlik reaksiyon sonunda deney numunelerinin fazla bir ağırlık kaybetmedikleri anlaşılmaktadır. Reaksiyon sırasında $\sim 500^{\circ}\text{C}$ bölgesinde çok az endotermik olay meydana gelmiştir. 3 saat sonunda numunelerin fazla ağırlık değişimine ve endotermik olaya maruz kalmamaları, çimentoya değişik oranlarda SD katılmış olması ile numunelerin yavaş priz alan malzeme özeliğine dönüşmesi ile açıklanabilir. Bu aşamada kontrol numunesine göre %20 SiFeCr katkılı çimento bünyesindeki suyun buharlaşması şeklinde bir ağırlık kaybı ve $\sim 300^{\circ}\text{C}$ bölgesinde de ekzotermik bir olayı söz konusudur. Diğer karışımlar ise kontrol numunesine göre daha az ağırlık değişimine maruz kalmışlardır.

24 saatlik reaksiyon sonunda deney numuneleri 3 saatlik numunelere göre daha çok ağırlık kaybetmişlerdir. Numunelerin hepsinde $\sim 500^{\circ}\text{C}$ bölgesinde dikkate değer endotermik olay meydana gelmiştir. Kontrol ve %20 FeSi katkısı içeren çimento bünyesindeki suyun buharlaşması şeklinde çok az ağırlık değişimine maruz kalırken, %20 SiFeCr katkılı çimento 3 saatlikte olduğu gibi en çok ağırlık değişimine maruz kalmıştır. Tüm numunelerde en fazla ağırlık değişimi $\sim 450\text{--}550^{\circ}\text{C}$ arasında meydana gelmiş

olup endotermik olay da aynı sıcaklıklar arasında meydana gelmiştir.

Deney numuneleri 3. günde de ağırlık kaybetmeye devam etmişlerdir. Numunelerin hepsinde $\sim 500-550^{\circ}\text{C}$ bölgesinde dikkate değer endotermik olay meydana gelmiştir. Daha sonraki sıcaklıklarda ise bazen endotermik bazende ekzotermik olay meydana gelmiş olup, dikkate değer değildirler. Bu deney yaşında en fazla ağırlık değişimine kontrol daha sonra %20 SiFeCr katkılı çimento bünyesindeki suyun buharlaşması şeklinde bir ağırlık değişimine maruz kalmıştır. Benzer şekilde, en çok endotermik olaya kontrol çimentosu maruz kalmıştır. Tüm numunelerde dikkate değer fazla ağırlık değişimi ve endotermik pik $\sim 480-550^{\circ}\text{C}$ arasında meydana gelmiştir.

7. günde de ağırlık değişimi devam etmiştir. Numunelerin hepsinde $\sim 500-550^{\circ}\text{C}$ bölgesinde dikkate değer endotermik olay meydana gelmiştir. Daha sonraki sıcaklıklarda ise, bazen endotermik bazende ekzotermik olay meydana gelmiş olup %10 SiFeCr katkılı çimento $\sim 800-900^{\circ}\text{C}$ arasında çok küçük ekzotermik olay yapmıştır. Bu deney yaşında en fazla ağırlık değişimi kontrol ve %20 FeSi katkılı çimentolar olup, değişim bünyelerindeki suyun buharlaşması şeklindedir. Çimentolarda dikkate değer ağırlık değişimi $\sim 480-550^{\circ}\text{C}$ arasında meydana gelmiş olup, endotermik olay da aynı sıcaklıklar arasında meydana gelmiştir.

28. günde de ağırlık değişimi devam etmiştir. Fakat, bu yaşta SiFeCr katkılı çimentolar FeSi katkılı çimentolara göre daha az ağırlık değişimine maruz kalmaya başlamışlardır. Numunelerin hepsinde önce $\sim 450-550^{\circ}\text{C}$ daha sonra da $\sim 700-800^{\circ}\text{C}$ bölgesinde dikkate değer ağırlık değişimi meydana gelmiştir. Benzer şekilde, numunelerde ilk endotermik olay $\sim 450-550^{\circ}\text{C}$ bölgesinde, daha sonrada $\sim 750-820^{\circ}\text{C}$ bölgesinde kontrol, %10 FeSi ve %10 SiFeCr katkılı çimentolar endotermik olaya maruz kalırken, %20 FeSi ve SiFeCr katkılı çimentolar ekzotermik pik göstermişlerdir. Daha sonraki sıcaklıklarda ise, bazen endotermik bazende

ekzotermik olay meydana gelmiş olup, dikkate değer değildirler. Bu deney yaşında en fazla ağırlık değişimine kontrol ve %10 FeSi katkılı çimentoları maruz kalmışlardır. Benzer şekilde, en çok endotermik olaya %10 FeSi katkılı çimento maruz kalmıştır. Tüm numunelerde dikkate değer fazla ağırlık değişimi $\sim 400-550^{\circ}\text{C}$ arasında olup, endotermik olay ise $\sim 480-550^{\circ}\text{C}$ arasında meydana gelmiştir.

Ağırlık değişimi 90. günde de yine söz konusudur. Fakat, 28. günde olduğu gibi bu yaşta da SiFeCr katkılı çimentolar FeSi katkılı çimentolara göre daha az ağırlık değişimine uğramışlardır. Numunelerin hepsinde dikkate değer ağırlık kaybı meydana gelmiş olup, maksimum ağırlık değişimi kontrol çimentosunda meydana gelmiştir. Benzer şekilde, çimentolarda endotermik olay önce $\sim 450-550^{\circ}\text{C}$ bölgesinde maksimum olmak üzere sıcaklık arttıkça azalan bir pik oluşturmaktadırlar. Maksimum endotermik olayı %10 SiFeCr katkılı çimento yapmıştır.

Şekil 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 ve 5.12'de gösterilen TGA grafiklerinden TG1 (kaba ağırlık kaybı) grafiklerinde birbirlerine çok yakın ağırlık kayıpları söz konusudur. Fakat, TG2 (ince ağırlık kaybı) grafiklerinde ise ağırlık kayıpları çok daha net görünmektedir. Buna göre, 3 ve 24 saatlik hidratasyon sonunda en çok ağırlık kaybı %20 SiFeCr olmaktadır. 3, 7 ve 90. günde ise en çok ağırlık kaybı kontrol numunesinde olmaktadır. 28. günde kontrol ve %10 FeSi katkılı çimento birbirine çok yakın ağırlık kaybına uğramıştır. Bu sonuçlara göre, SD katkılı çimentoların hidratasyon gelişiminde fazla ağırlık kaybının olmayacağını ifade etmektedir.

6. TOZ, HAMUR ve HARÇLAR ÜZERİNDE YAPILAN DENEYLER ve SONUÇLARI

6.1. Toz Karışımları Üzerinde Yapılan Deneyler

6.1.1. Giriş

Fırından çıkan klinkerin öğütülmesi sonucu çimentoyu oluşturan ve boyutları genel olarak 90 μ 'dan küçük olan taneler elde edilir. Genel olarak çimentolarda 90 μ 'dan büyük tanelerin miktarının %14'den fazla olmaması istenir. Tane boyutları ise bazı durumlarda 1 μ 'a kadar inebiliyorsa da genellikle tanelerin 2.5 μ 'dan büyük olduğunu belirtmek mümkündür.

Çimentoların bağlayıcılık özeliğini arttırmada incelik iki açıdan önemlidir. Birincisi; inceliği fazla olan çimento, agrega tanelerini, inceliği az olandan daha iyi ve devamlı bir şekilde kaplar. Çimentonun agrega tanelerini devamlı bir şekilde kaplamasıyla bağlayıcı madde ile agrega arasında iyi bir aderans sağlar ve betonun dayanımını artırır. İkincisi; inceliğin artmasıyla su ile reaksiyona giren çimento tanelerinin toplam yüzeyinde önemli bir artış meydana gelir. Bundan dolayı hidrasyon olayının hızı veya belirli bir süre içinde meydana gelen hidrate eleman miktarı artar.

Pratik bakımdan, boyutları 100 μ 'dan büyük olan çimento taneleri hidrasyon olayına katılmaz. Genel olarak tane boyutları 10-24 μ arasında bulunan çimentoda hidrasyon hızlı bir şekilde gelişebilir ve bağlayıcı madde dayanımı büyük değerler alabilir. 10 μ 'dan küçük tanelerin çimento içinde belli oranlarda bulunması bağlayıcı maddenin dayanımını arttırdığı gibi taze betonun plastik olmasını ve yeter derecede geçirimsizlik elde edilmesini sağlar. Boyutu 1 μ 'dan küçük olan taneler su ile teması geçer geçmez (karıştırma işlemi sürdürülürken) hidrate oldukları için betonda bağlayıcılık görevini yerine

getirememektedirler. Bu nedenle, çimento içinde çok ince tanelerin bulunması zararlı olabilmektedir.

Genel olarak özetlenecek olursa;

- Çimento taneleri 2.5-90 μ arasında olmalıdır,
- Boyutu 20 μ 'dan küçük olan taneler dayanım kazanmada başlıca etkindir,
- Boyutları 5 μ 'dan küçük olan taneler prizin çabuk olmasına neden olurlar,
- Boyutları 50 μ 'dan büyük olan taneler ise tamamen hidrate olmamaktadırlar.

Çimento inceliği hakkında bilgi veren diğer bir karakteristik de özgül yüzey miktarıdır. Bu karakteristik ile 1 g çimento içinde bulunan tanelerin cm^2 cinsinden toplam yüzey alanı anlaşılmaktadır. Bir çimentonun özgül alanının büyük olması çok ince öğütülmüş olduğunu ifade eder. Özgül alanının fazla olmasıyla su ile temasa geçen çimento tanelerinin yüzeyi fazla olmakta ve bu da bağlayıcı maddenin priz ve sertleşme olaylarını olumlu yönde etkilemektedir.

Katkılı ve katkısız çimentoların kimyasal bileşimleri bakımından hangi koşulları yerine getirmesi gerektiği 20 Ekim 1994 tarih ve 22087 sayılı Resmi Gazete'de belirtilen yeni bileşimler Tablo 6.1'de verilmiştir.

Çimentonun içinde bulunan zararlı maddeler doğrudan doğruya hacim sabitliğini bozan maddelerdir. CaO , MgO ve SO_3 bunlara örnek olarak gösterilebilir. CaO ve MgO 'nun ısı ile yaptıkları reaksiyon sonunda önemli bir hacim artışı meydana getirir. MgO 'nun fazla miktarda bulunması, bir bakıma CaO 'ya göre daha tehlikelidir. Zira, sönmemiş kirecin reaksiyonu kısa zamanda sona ererken MgO 'nun reaksiyonu ise yavaş bir seyir izleyerek yıllarca sürebilir. Hacim sabitliği özeliği üzerinde zararlı etki yapan üçüncü madde de SO_3 'tür. SO_3 , sülfoalüminat tuzunu meydana getirerek önemli ölçüde hacim artışına neden olur.

Tablo 6.1, Katkılı ve Katkısız Çimentoların Kimyasal Bileşimleri

Bileşenler	TS 19/Nisan 1994 Portland Çimentosu	TS 10156/Nisan 1994 Katkılı Çimento
	% En Çok	% En Çok
SO ₃	3.5	3.5
MgO	5	5
Kızdırma Kaybı	4	4
Çözünmez Kalıntı	1.5	---
Cl (Klorür)	---	0.1
Puzolanik Madde	---	19

6.1.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Deneylerde kullanılan çimento ve silis dumanı toz karışımlarının incelik, özgül ağırlık ve özgül yüzey tayini TS 24, kimyasal analizler ise TS 687 esasına göre Elazığ Altıova Çimento Fabrikası Kimya Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Toz karışımlarının incelik sonuçları Tablo 6.2'de, özgül ağırlık, özgül yüzey ve kimyasal analiz sonuçları ise Tablo 4.1'de verilmiştir.

Toz karışımlarının incelik tayini vakumlu elek makinesinde yapılmıştır. 105±5°C'lik etüvde kurutulmuş PÇ ve PÇ+SD toz karışımlarından 0.1 g hassasiyetli bir terazide 10 g tartılır. Önce 200 nolu elekten daha sonrada 90 nolu elekten elendikten sonra elek üstünde kalan miktar 0.1 g hassasiyetindeki terazide tekrar tartılarak bulunur.

Katkısız çimentonun özgül yüzeyin bulunmasında Blaine aleti kullanılmıştır. Blaine aleti, standard koşullarda sıkıştırılmış katkısız çimento tabakasından havanın geçme zamanını ölçme esasına dayanır. Numune tabakası hazırlandıktan sonra manometredeki sıvı seviyesinin (U) borusunun alt çizgisinde olup olmadığı kontrol edilir. Hücre dışına vazelin sürüldükten sonra manometrenin üstündeki yere yerleştirilir. Deney sırasında numune tabakasının durumunun bozulmamasına dikkat edilir. Hücrenin ağzı sol elin baş parmağı ile hava geçirmeyecek şekilde kapatılır. Manometre borusundaki sıvı seviyesi en üst

çizgiye gelinceye kadar lastik bir pompa vasıtası ile manometre içindeki hava emilir. Musluk kapatılarak sıvı bu seviyede tutulur. Sol elin baş parmağı hücrenin ağzından çekilir. Sıvı seviyesi ikinci çizgiye geldiği anda kronometre çalıştırılır. Sıvı seviyesi üçüncü çizgiye gelince kronometre durdurulur. Akış süresi (t) saniye olarak tespit edilir. Oda sıcaklığı kaydedilir. Çimentonun özgül yüzeyi (S):

$$S = K \times \frac{\sqrt{e_3} \times \sqrt{t}}{d(1-e) \sqrt{\eta}}$$

formülü ile cm^2/g olarak bulunur.

SD katkılı toz karışımlarının özgül yüzeyleri Blaine aleti ile bulunamamıştır. Deneyde kullanılacak toz karışımı aletin numune koyma hücreğine sığmadığı için hassas ölçüm yapılamamıştır. Fakat, ACI Committee 226'ya (1987) göre, silis dumanlarının özgül yüzeyleri (nitrogen adsorption tekniğine göre) $20000 \text{ m}^2/\text{kg}$ 'dır.

Katkılı ve katkısız çimentoların kompozisyonunda bulunan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Kızdırma Kaybı, Çözünmez Kalıntı ve Tayin Edilemeyen minerallerin % olarak bileşim miktarları TS 687 esasına göre yapılmıştır.

Tablo 6.2, İncelik Deney Sonuçları

Karışımlar	İncelik	
	200 Nolu Elek	90 Nolu Elek
%100 PÇ	0.5	7.6
%90 PÇ+%10 FeSi	0.4	7.5
%85 PÇ+%15 FeSi	0.4	7.2
%80 PÇ+%20 FeSi	0.3	7.1
%75 PÇ+%25 FeSi	0.4	6.5
%70 PÇ+%30 FeSi	0.2	6.3
%90 PÇ+%10 SiFeCr	0.4	7.4
%85 PÇ+%15 SiFeCr	0.4	7.3
%80 PÇ+%20 SiFeCr	0.3	6.9
%75 PÇ+%25 SiFeCr	0.2	6.5
%70 PÇ+%30 SiFeCr	0.2	6.3

6.1.3. Tartışma

Deneylerde kullanılan katkılı ve katkısız tüm çimentoların kimyasal bileşiminde (Tablo 4.1 ve 4.2) bulunan SO_3 ve MgO 'nun yanısıra kızdırma kaybı ve çözünmez kalıntı yüzdesi bakımından Tablo 6.1'de verilen yeni sınır değerlerin altındadır. Ayrıca, kimyasal bileşimi bakımından Tip I çimentosu özelliğini göstermektedir.

TS 19'a (1985) göre, portland çimentolarında özgül yüzey $2400 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dan az olmamalıdır. Özgül ağırlık ise, $3.05-3.15 \text{ g/cm}^3$ arasında bir değer almalıdır. Deneylerde kullanılan PÇ'nin özgül yüzeyi $3493 \text{ cm}^2/\text{g}$, özgül ağırlığı ise 3.10 g/cm^3 'tür. Bu verilere göre, çimentonun özgül yüzey ve özgül ağırlık bakımından uygun olduğu anlaşılmaktadır.

TS 19'a (1985) göre, 200 nolu elcik üstünde kalan miktar %1, 90 nolu elek üstünde kalan miktar ise %14 olmalıdır. Tablo 6.2'de verilen çimento incelik verileri TS 19 sınır değerleri bakımından da uygundur.

6.2. Hamur Karışımları Üzerinde Yapılan Deneyler

6.2.1. Giriş

Çimentoların harç, beton vb üretimlerde kullanılmadan önce priz başlama ve sona erme sürelerinin yanısıra hacim genleşme özelliği hakkında genel bir bilgi edinilmesinde yarar vardır. Priz sonu süresi uzun olan veya anormal bir hacim genleşmesine sahip olan çimentoların kullanılması durumunda önlemlerin alınmasını gündeme getirir.

Portland çimentolarının priz başlangıcı 1 saatten az, priz sonu ise 10 saatten fazla olmaması, hacim sabitliği açısından da 10 mm 'den fazla genleşme yapmaması istenir. Bunların sağlanmaması durumunda ise özel önlemler alınmalıdır. Örneğin; TS 24'de öne sürülen priz süreleri konusunda standard verileri sağlayamayan çimentoların harç,

beton vb üretimlerde kullanılması durumunda, çimento ağırlığının belli bir miktarı kadar priz hızlandırıcı veya geciktirici SA kullanılmasını gerektirecektir. SA'ların kullanılması ise maliyeti olumsuz yönde etkileyecektir.

6.2.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Katkısız ve SD katkılı çimentoların priz süresi tayini deneyi $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ve nisbi nemi %50-60 olan bir oda içinde yapılmıştır. Deney sırasında vicat halkası içindeki normal kıvama göre hazırlanan hamurlar her türlü sarsıntıya karşı korunmuştur.

Katkısız ve SD katkılı hamur karışımlarının priz başlangıç sürelerinin tesbiti için iğne 5 dakikada bir hamura batırılır. İğnenin bir defa girmiş olduğu yere bir daha girmemesi için vicat halkasının durumu her batırılıştan sonra değiştirilir ve iğne üstüğü ile iyice silinir. İğne, cam levhaya 3-5 mm uzaklıkta kaldığı an priz başlamış sayılır. Priz sona erme süresinin tespiti için priz başlamasından sonra iğne her 15 dakikada bir batırılarak priz sonu bulunur. İğnenin hamura en çok 1 mm girebildiği zaman priz sona ermiş sayılır.

Katkısız ve SD katkılı karışımların hacim sabitliği Le Chatelier aleti ile bulunmuştur. Bunun için normal kıvama göre hazırlanan karışımlar halkanın içine özenle konularak aletin sivri uçları metal pul ile sabitleştirilir. Hamur karışımları yağlı cam levhalar arasına konulduktan sonra üstüne ağırlık konularak ve sabitleştirme pulu serbest bırakılır. Çubuk uçlarının açıklığı 0.1 mm hassasiyetle ölçüldükten sonra (a) değeri bulunur. Hamur karışımlarının (a) değeri bulunduktan sonra $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 'deki suya konulur. 24 saat sonra uçların açıklıkları tekrar ölçülerek (b) değeri bulunur. Daha sonra numuneler 4 saat kaynamaya bırakılır. Kaynama sonunda numuneler laboratuvar ortamında soğutuluncaya kadar bekletilir ve uçların açıklıkları tekrar ölçülerek (c) değeri bulunur. Kaynama sonu açıklık

ile ilk açıklık arasındaki fark mm cinsinden toplam hacim genleşme miktarını verir. TS 19 verilerine göre çimento hamurlarının $b-a \leq 4$ mm ve $c-a \leq 10$ mm'den fazla hacim genleşmesi yapmaması istenir.

Yukarıda açıklanan esaslara göre yapılan deneyler sonucu katkısız ve SD katkılı hamur karışımların priz süreleri ve hacim genleşme sonuçları Tablo 6.3'de verilmiştir.

Tablo 6.3, Priz Süreleri ve Hacim Genleşme Deney Sonuçları

Karışımlar	Hacim Genleşmesi (c-a) (mm)	Priz Başlama Sonu (Saat.Dakika)	
K	6	2.00	3.10
F10	6	2.35	3.35
F15	5	2.55	4.30
F20	4	5.30	YOK
F25	4	7.10	YOK
F30	4	8.25	YOK
S10	5	2.50	3.45
S15	5	3.15	4.25
S20	4	5.45	YOK
S25	4	7.05	YOK
S30	4	8.15	YOK
KA	---	1.30	2.15
F10A	---	1.40	2.25
F15A	---	2.05	2.55
F20A	---	4.00	6.50
S10A	---	1.45	2.25
S15A	---	2.25	3.05
S20A	---	4.05	7.00

6.2.3. Tartışma

SD, priz başlangıç ve sonu sürelerini olumsuz yönde etkilemiştir. Tablo 6.3'deki %20'den fazla SD katkılı karışımlar priz başlama ve sonu sürelerini standard değerlerin üstüne çıkarmıştır. Bu nedenle, priz sürelerinin standartların belirttiği sınır değerler içerisinde

tutulabilmesi için priz hızlandırıcı SA'ların kullanılmasını gerektirmiştir. Bu vesile ile, beton, harç vb üretimlerde %20'den fazla SD kullanılması durumunda priz hızlandırıcı SA'ların kullanımı sözkonusu olacaktır.

Burada (b-a) farkı çimento içinde bulunan CaO hakkında, (c-a) farkı ise MgO hakkında bir fikir verir. Çimento hamurları kaynar su içinde bulunduğu sırada MgO su ile reaksiyon yaparak hamur hacminin artmasına neden olur.

TS 19'da öne sürülen verilere göre (b-a) ve (c-a) farkları oldukça küçük bir değer almıştır. Bu sonuçlar neticesinde, FeSi ve SiFeCr'un değişik oranlarda (%30'a kadar) PÇ'ye katılmasıyla elde edilecek katkılı çimentoların anormal bir hacim genleşmesi yapmayacağı sonucuna varılmıştır.

6.3. Harç Karışımları Üzerinde Yapılan Deneyler

6.3.1. Kıvam

6.3.1.1. Giriş

Gününüzde işlenebilme özeliğini ölçmek için ileri sürülen metotların sayısı 20'yi geçmektedir. Bu deneyler arasında, uygulama kolaylığı ve gerçek kıvamı en iyi bir şekilde belirtmesi bakımından uygun olanı Flow Test metodudur.

6.3.1.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Kıvam (Flow Test) aşağıda belirtilen esasa göre yapılmış olup, elde edilen sonuçlar Tablo 6.4'de verilmiştir. Kıvam deneyi için, araştırma kapsamına alınan karışımlara esas olmak üzere; 1 kısım çimento, 3 kısım standard kum ve yaklaşık 1/2 kısım su ile hazırlanan ön deneme karışımları sarsma tablası aletinde (flow test)

deneye tabi tutularak sonuçları irdelendi. Karışımlar, sarsma tablasının kalıbına iki aşamada, çimento harcı sıkılayıcısı ile yerleştirildikten sonra, çelik cetvel ile harcın üst yüzeyi düzeltilir. Kalıp çıkarıldıktan sonra, sarsma tablası kolu 15 saniyede 25 dönüş yapacak şekilde çevrilir. Sarsma tablası ise her donüşte 12.5 mm'lik yükseklikten düşüş yapmaktadır. Bu düşüş sonucu meydana gelen sarsıntılar sonucunda taze harçların yapmış olduğu yayılmalar ölçülür. Bu şekilde yayılmış karışımların yeni çapları (Ds) ve deneye başlamadan önceki çapları ise (Di) ile gösterilir. Normal kıvam %105'tir. Karışımlarda kullanılan su miktarı yayılma yüzdesi

$$Ds-Di$$

$$Kıvam = \frac{Ds-Di}{Di} \times 100 \approx 105-115$$

$$Di$$

oluncaya kadar değiştirilerek ve deneme bir çok kez tekrarlanarak ~105-115 yayılma için gerekli su miktarı bulunur. Sonuçta $(Ds-Di/Di) \times 100$ oranı ile karışımların kıvam değerleri bulunmuştur. Bu oranın büyük değerler alması durumunda numunenin işlenebilme özeliğinin o kadar yüksek olduğu söylenebilir. Karışımların su miktarının düşürülmesi amacıyla kullanılan SA miktarı ise PÇ, PÇ+FeSi ve PÇ+SiFeCr'un %0.36-%0.52'si kadardır.

Tablo 6.4, Kıvam Deneyi Sonuçları

SA'sız Karışımlar	% Kıvam	SA'lı Karışımlar	% Kıvam
K	114	KA	106
F10	109	F10A	109
F15	110	F15A	110
F20	108	F20A	108
F25	112	S10A	109
F30	110	S15A	110
S10	109	S20A	107
S15	112		
S20	113		
S25	114		
S30	113		

6.3.1.3. Tartışma

SD, kıvamı olumsuz yönde etkilemiştir. Yüksek karışım oranında, ilave su ihtiyacını gündeme getirmiştir. Bu nedenle, gerek kıvam miktarının standartların belirttiği sınır değerler içerisinde tutulabilmesi için süper akışkanlaştırıcı SA'ların kullanılmasını gerektirmektedir. Söz konusu SA'ların kullanımı ise beton maliyetini olumsuz yönde etkileyecektir.

6.3.2. Aktivite

6.3.2.1. Giriş

PÇ'nin hidratasyonu sonunda meydana gelen sebest kirecin suda çözünmesi ve bu maddenin dayanımının düşük olması çimentonun en zayıf tarafını oluşturur. Çimentoya karıştırılan puzolan sebest kireçle birleşmek suretiyle bu maddenin çözünmesini önler ve ilave dayanım kazandırır.

Puzolanlı çimentoların portland çimentosuna göre üstünlükleri şunlardır:

- Puzolanlı çimentolarda priz esnasında açığa çıkan ısı miktarı, portland çimentoda meydana gelenden daha azdır.

- Puzolanlı çimentoları kullanmakla, serbest kirecin tespit edilmiş olmasıyla, geçirimsizliği daha az olan harç ve beton üretmek mümkündür.

- Puzolanlı çimentolarla üretilmiş elemanlar donmaya karşı daha dayanıklıdır.

- Puzolanların portland çimentosuna karıştırılması ile bağlayıcı maddenin maliyet bedelinde bir azalma sağlanır.

- Puzolanlı çimentolarla üretilmiş elemanlar her türlü zararlı kimyasal sulara karşı dayanımı portland çimentosuna göre daha iyidir.

Bu üstünlüklerinin yanı sıra, bazı olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Kısaca bunlar;

- Hidratasyon ıssısının daha az olmasından dolayı puzolanlı çimentolar soğuk havalarda kullanılmaya elverişli değildir.

- Puzolanlı çimentolar kullanılarak üretilen betonlar daha uzun süre ve daha iyi koşullar altında korunması gerekmektedir.

- Puzolanların çimentoya karıştırılması mekanik dayanımların zamanla artış hızını bir miktar düşürür. Bu durum, puzolanlı çimentolarda hidratasyon hızının daha düşük olmasından ileri gelmektedir. Bundan dolayı, bu çimentoların ilk günlerdeki dayanımlarının portland çimentosunun aynı günkü dayanımlarından küçük olması mümkündür. Dayanımdaki bu azalma zamanla azalarak, en sonunda, tamamen kaybolur. Hatta puzolanlı çimentoların en son dayanımı, kirecin tesbit edilmiş olmasıyla, portland çimentosunun dayanımından daha büyük değerler alabilmektedir (Postacioğlu, 1986).

6.3.2.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Çimentoda kullanılacak puzolanların aktivitelerin belirlenmesi bakımından TS'lerde değişik metotlar ileri sürülmektedir. Bu deney metotları kimyasal ve mekanik yöntemlere dayanmaktadır.

Araştırma kapsamına alınan SD'nin aktivite deneyleri için mekanik yöntemler tercih edilmiştir. SD'nin aktivitenin ortaya çıkarılması için TS 25'de ileri sürülen Kireçle Puzolanik Aktivite ve TS 639'da Çimento İle Puzolanik Aktivite deneyleri yapılmış olup, elde edilen sonuçlar Tablo 6.5'de verilmiştir.

Kireçle puzolanik aktivite için gerekli malzeme miktarı TS 24'de verilen Çizelge 3'den alınmıştır. Her deney için üç numune hazırlanmıştır. Taze harç karışımları sarsma tablasında kalıplara doldurulur. Kalıpların üstü buharlaşmayı önleyecek şekilde kapatıldıktan sonra kenarları sıkıca yapıştırılmıştır. Numuneler oda

sıcaklığında (23°C) bekletilir. 24 saat sonunda kalıplar sökülmeden 55°C'lik etüv içinde 6 gün beklemesi sağlanır. Numuneler kırılmadan 4 saat önce etüvden çıkarılarak oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Numunelerin basınç ve eğilmede çekme dayanımları TS 24'e göre yapılır. Eğilmede çekme dayanımının 1.0 MPa ve basınç dayanımının da 4.0 MPa'dan büyük olması durumunda maddenin puzolanik özeliğe sahip olduğu kabul edilir.

Çimento ile puzolanik aktivite için gerekli malzeme miktarı TS 639'da verilen Çizelge 3'den alınmıştır. Aktivite deneyi; portland çimentosu ile ile hazırlanan karşılaştırma numuneleri ile PÇ+SD karışımından yapılmış harç numunelerinin basınç dayanımları kıyaslanarak yapılır.

Önce katkısız çimento kullanılarak yapılan kontrol karışımındaki çimentonun mutlak hacmi bulunur. Deneme karışımı hazırlamak için yukarıda elde edilen çimento hacminin %35'i SD + %65'i PÇ olmak üzere SD ve PÇ birbirine karıştırılır. Kireçle aktivitede olduğu gibi, her karışımdan üçer numune hazırlanır. Sarsma tablasında sıkıştırıldıktan sonra numuneler oda sıcaklığında (23°C) bekletilir. 24 saat sonunda kalıplar sökülerek 23°C'deki suda deney gününe kadar koruma altına alınır.

Numunelerin basınç ve eğilmede çekme dayanım değerleri 2, 7 ve 28. günlük ikon alınır. SD katkılı numunelerin 28 gün sonunda kontrol numunesinin aynı süredeki basınç dayanımlarının %70'inden az dayanım göstermemesi durumunda aktif olarak kabul edilir.

Tablo 6.5, Aktivite Deney Sonuçları

Kireç İle Aktivite (MPa)			FeSi	SiFeCr
Basınç (7. Gün)			8.9	10.25
Eğilmede Çekme (7. Gün)			2.2	1.2
Çimento İle Aktivite (MPa)		PÇ	FeSi	SiFeCr
2. Gün	Basınç	17.6	8.3	9.3
2. Gün	Eğilmede Çekme	4.25	2.30	2.50
7. Gün	Basınç	28.9	17.5	21.4
7. Gün	Eğilmede Çekme	5.20	3.50	4.4.
28. Gün	Basınç	33.4	30.1	27.0
28. Gün	Eğilmede Çekme	6.70	6.20	6.10

6.3.2.3. Tartışma

Kireç ile yapılan aktivite deneyi sonuçları TS verileri ile karşılaştırıldığında oldukça aktif olduğu anlaşılmıştır. Çimento ile yapılan aktivite deney sonuçları ile karşılaştırıldığında şu sonuç ortaya çıkmıştır. SD katkılı karışımlar ilk 2 gün sonunda çok düşük bir aktiflik göstermiştir. SD katkılı numuneler 28 günlükken kontrol numunelerine eşdeğer bir basınç ve eğilmede çekme dayanımı sergilemeye başlamışlardır.

6.3.3. Basınç ve eğilmede çekme dayanımı

6.3.3.1. Giriş

Çimentoların basınç ve eğilmede çekme dayanımlarının tesbit edilmesi mekanik deneylere dayanır. Bu deneyler sonunda bulunan basınç ve eğilmede çekme dayanımları harçlarda kullanılan çimentonun mekanik dayanımı olarak kabul edilir.

Çimento özelliklerinin dayanımlar üzerine etkisi, büyük ölçüde bunların hidratasyon olayının hızlı veya yavaş bir şekilde gelişmesi ile açıklanır. Hidratasyon sürecini etkileyen başlıca iki özellik, çimentonun inceliği ve karmaşık bileşimlerinin miktarıdır. Bu özelliklerin etkilemelerinden dolayı muhtelif cins çimentoların mekanik dayanımları birbirinden farklı olduğu gibi ayrı tür çimento, örneğin portland çimentoları, dayanım bakımından büyük farklılıklar gösterebilir.

Çimento inceliğinin artmasıyla, bağlayıcı maddenin dayanım kazanması hızlanır ve böylelikle 7, 28 ve 90 günlük dayanımlarında büyük artışlar elde edilir. Kimyasal bileşimin etkisi çimento içinde bulunan karmaşık bileşimlerin su ile yaptıkları reaksiyonların birbirinden farklı olmasından ileri gelmektedir. C_3S ve C_3A bileşimleri su ile hızlı bir reaksiyon yapar. Bu itibarla, bir portland

çimentosunda C_3S 'in fazla miktarda bulunması belirli bir süre içinde çimentonun fazla miktarda hidrasyon yapmasına yol açar ve bu durum özellikle 28 günlük dayanımların büyük değerler almasını sağlar. PÇ'nin diğer bir bileşimi olan C_2S 'in hidratasyonu oldukça yavaştır. Yani C_2S bileşiminin çimentoda fazla miktarda bulunması dayanımın yavaş bir şekilde artmasına neden olur. Bu karmaşık bileşimin daha ziyade 28 günden sonra dayanım artışında katkısı vardır.

Kimyasal bileşimin dayanım üzerine diğer bir etkiye şekli, karmaşık bileşimlerin hidratasyon sonunda meydana getirdikleri cisimlerin farklı iç yapıya sahip olmasından ve bunların miktarlarının birbirinden farketmesinden ileri gelmektedir. Bu durumu C_3A 'nın hidratasyonu sonunda oluşan hidrate elemanın C_3S 'in meydana getirdiği hidrate cisimden daha fazla boşluk içermesi ve dayanımının daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Böylelikle hidratasyon hızının çok yüksek olmasından dolayı C_3A başlangıçta dayanımı yüksek olan ürünler verir. Fakat, hidrate elemanlarının dayanımı C_3S ürünün dayanımından çok küçük değerler almaya başlar. C_4AF karmaşık bileşiminin hidratasyon sonunda dayanım kazanması, dayanımın daima C_3A 'dan küçük olmak üzere, C_3A 'ninkine gibidir.

Diğer taraftan C_3S ile C_2S arasında da şöyle bir durum sözkonusudur. C_2S 'in hidratasyonu C_3S 'in hidratasyonuna göre daha yavaş bir şekilde ilerlemesine rağmen bu karmaşık bileşimde daha az serbest kireç meydana geldiğinden dolayı C_2S hidrate elemanının en son dayanımı daha büyük olabilir.

6.3.3.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Sortleşmiş harç numunelerinde basınç ve eğilme çekme dayanım deneyleri TS 639 esasına göre yapılmış olup, 3 numunenin aritmetik ortalamaları Tablo 6.6 ve 6.7'de verilmiştir. Bu amaçla, normal harcın bileşimi ağırlık itibarıyla 1 kısım çimento (450 g), 3 kısım standard kum (1350 g) ve 1/2 kısım su'dan (225 g) meydana gelmektedir.

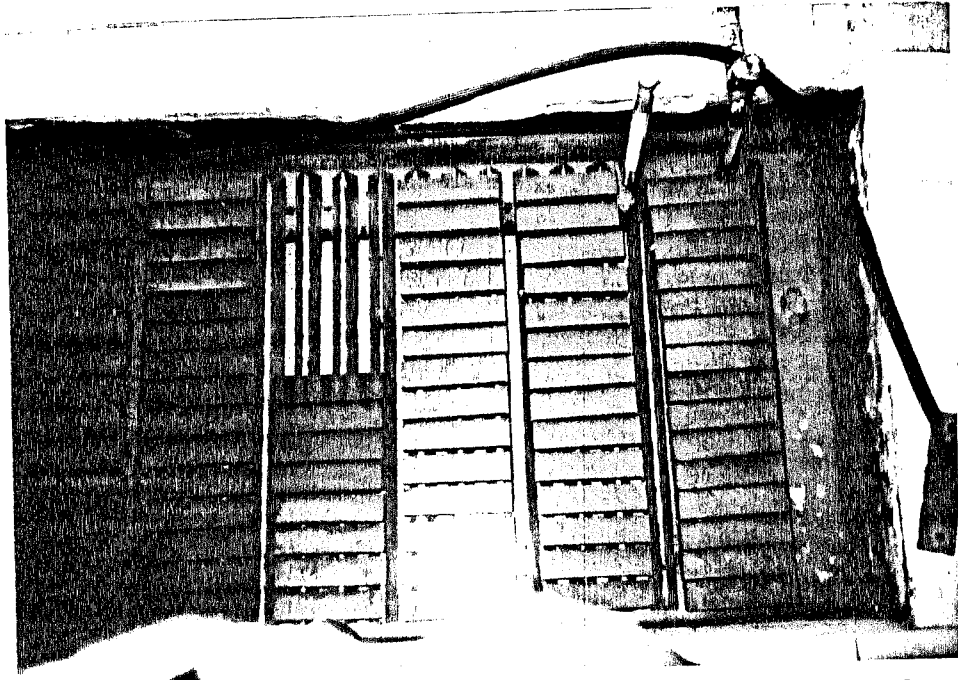
Elde edilen taze harç karışımları 40x40x160 mm olan çelik kalıplara doldurulur. Sarsma tablası ile sıkıştırılıp üst yüzeyi çelik master ile düzeltilerek % 90 bağıl nem ve $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de 24 saat süre ile koruma altına alınır. 24 saat sonra numuneler su tankına konularak (Fotograf 6.1) deney gününe kadar burada bekletilir.

Tablo 6.6, Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları (MPa)

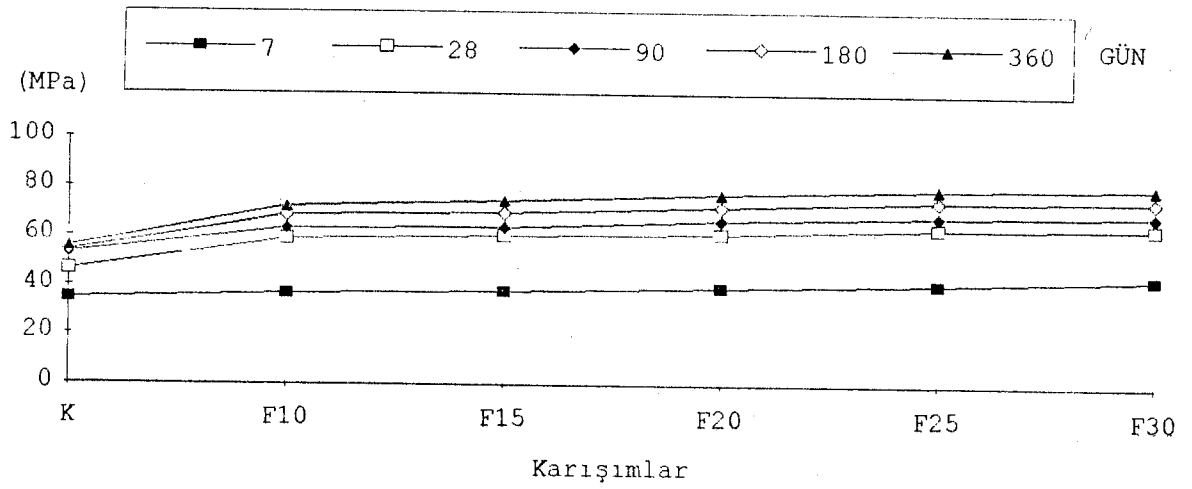
	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	1. Yıl	28 Günlük % Değişimi	1 Yıllık % Değişimi
K	34.6	46.3	53.2	54.2	55.8	100	100
F10	36.8	59.3	63.5	68.7	71.9	128	129
F15	37.8	60.5	63.8	69.3	74.7	131	134
F20	39.3	61.4	66.8	72.1	77.5	133	139
F25	41.1	63.8	68.7	74.8	79.6	138	143
F30	43.7	64.4	69.5	75.2	80.6	139	144
S10	35.9	50.4	61.2	67.1	69.7	109	125
S15	37.4	56.1	62.3	69.2	73.8	121	132
S20	38.0	55.8	63.5	71.5	74.1	120	133
S25	39.3	58.0	63.8	72.4	75.6	125	135
S30	39.5	59.5	68.3	75.0	78.9	128	141
KA	36.1	48.2	55.9	57.7	59.3	100	100
F10A	39.8	63.1	66.6	70.8	76.8	131	130
F15A	40.5	64.8	69.5	74.2	79.5	134	134
F20A	42.5	66.8	70.9	76.7	82.2	139	139
S10A	38.1	54.3	65.1	68.5	71.9	113	121
S15A	39.8	59.6	66.3	73.1	75.7	124	128
S20A	41.8	60.2	67.8	75.8	79.1	125	133

Tablo 6.7, Eğilmede Çekme Dayanım Deneyi Sonuçları (MPa)

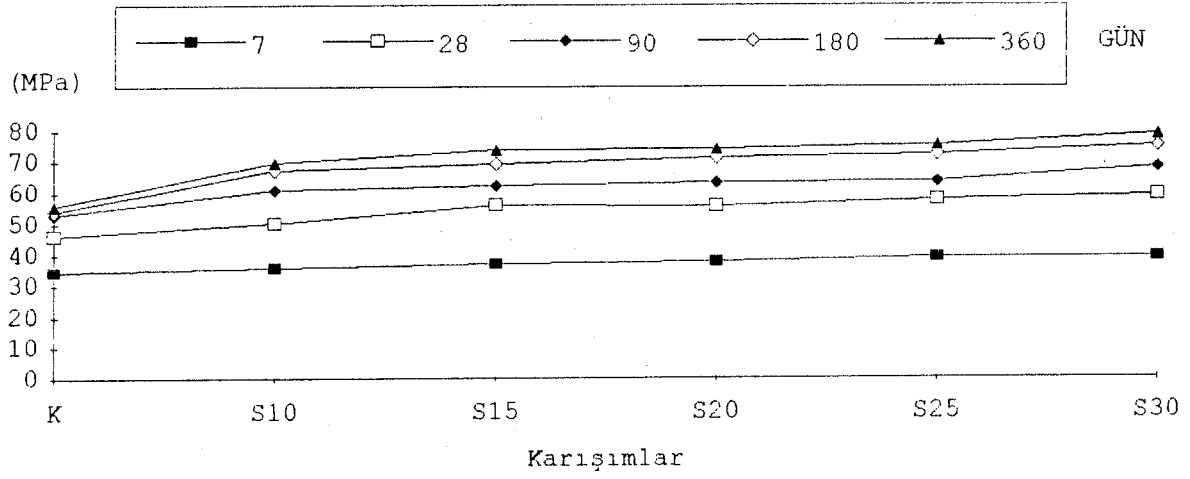
	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	1. Yıl	28 Günlük İçin % Değişimi	1 Yıllık % Değişimi
K	5.7	7.5	7.7	7.9	8.0	100	100
F10	6.0	8.3	9.2	9.6	9.8	111	123
F15	6.1	8.4	9.0	9.3	10.1	112	126
F20	6.3	8.5	9.3	9.5	10.3	113	129
F25	6.3	8.6	9.4	9.7	10.5	115	131
F30	6.5	8.7	9.5	9.7	10.5	116	131
S10	5.7	8.2	8.7	9.0	9.3	109	116
S15	6.2	8.4	8.6	9.1	9.4	112	118
S20	6.3	8.8	9.1	9.3	9.7	117	121
S25	6.3	8.9	9.3	9.6	9.9	119	124
S30	6.4	8.9	9.5	9.7	10.2	119	128
KA	6.1	7.9	8.3	8.7	9.1	100	100
F10A	6.3	8.9	9.4	9.0	10.5	113	115
F15A	6.4	9.1	9.6	9.9	10.6	115	116
F20A	6.8	9.2	9.7	10.3	10.9	116	120
S10A	6.3	8.5	9.2	9.3	9.8	106	108
S15A	6.3	8.7	9.3	9.5	9.9	110	109
S20A	6.6	9.2	9.6	9.8	10.1	116	111



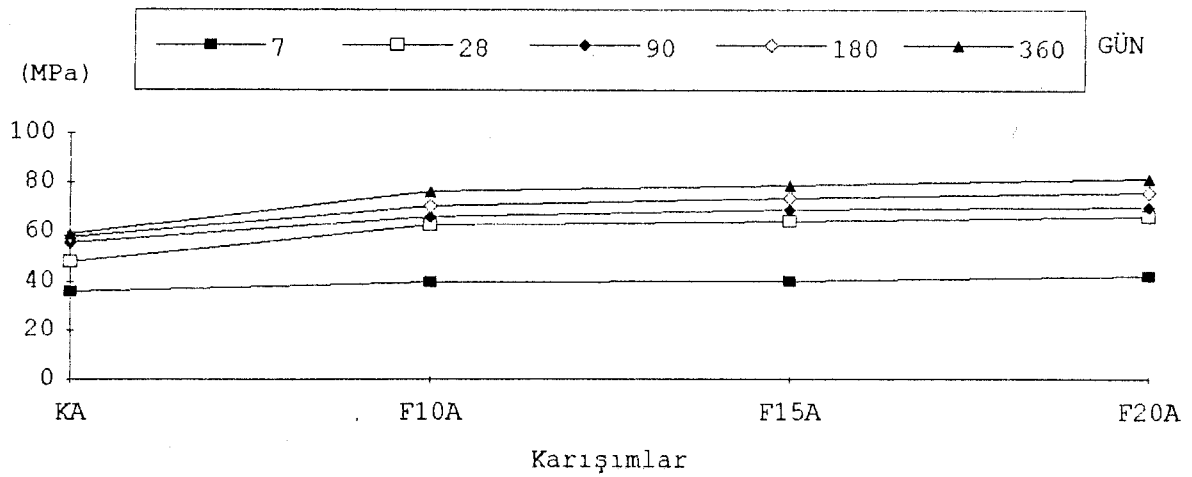
Fotograf 6.1, Basınç ve Eğilmede Çekme Dayanımı Deneylerine Tabi Tutulan Harç Numuneleri



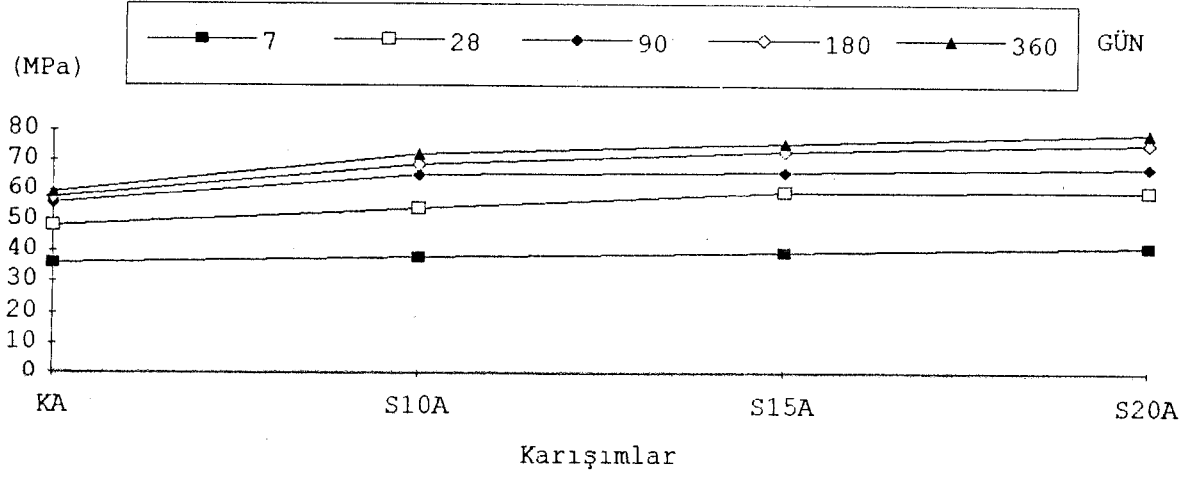
Şekil 6.1, FeSi Katkılı Harçların Basınç Dayanımı



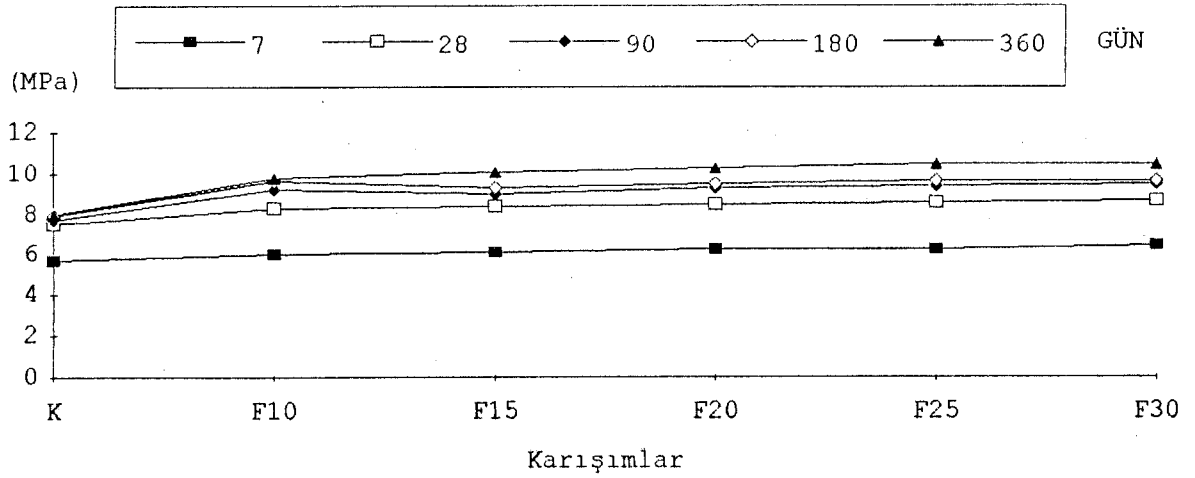
Şekil 6.2, SiFeCr Katkılı Harçların Basınç Dayanımı



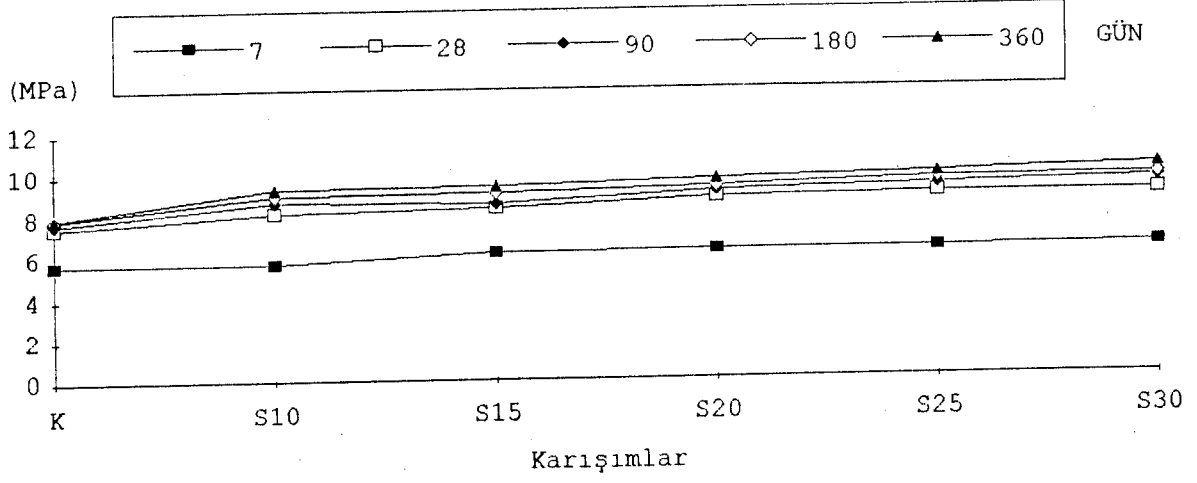
Şekil 6.3, SA Katkılı FeSi'li Harçların Basınç Dayanımı



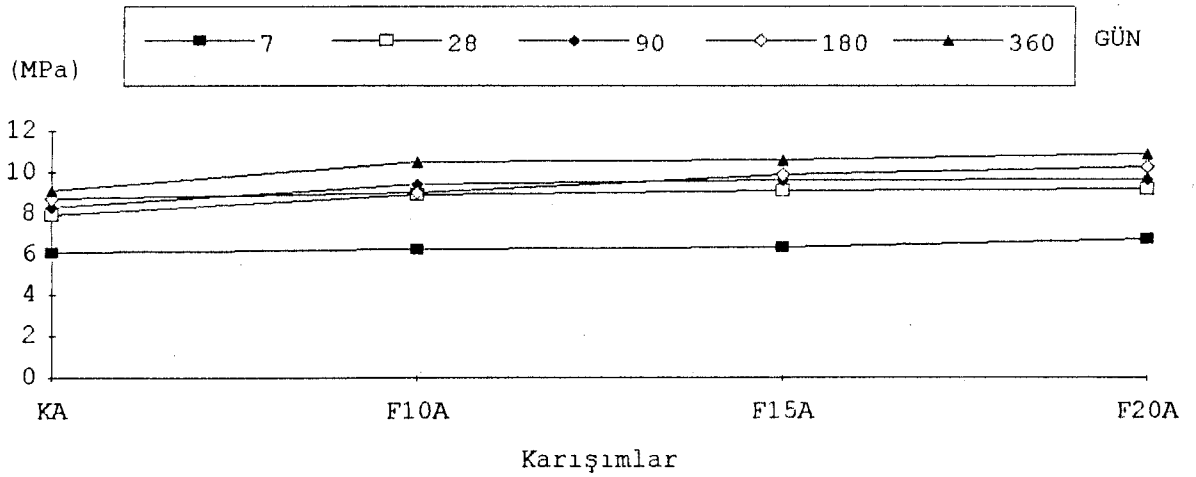
Şekil 6.4, SA Katkılı SiFeCr'lu Harçların Basınç Dayanımı



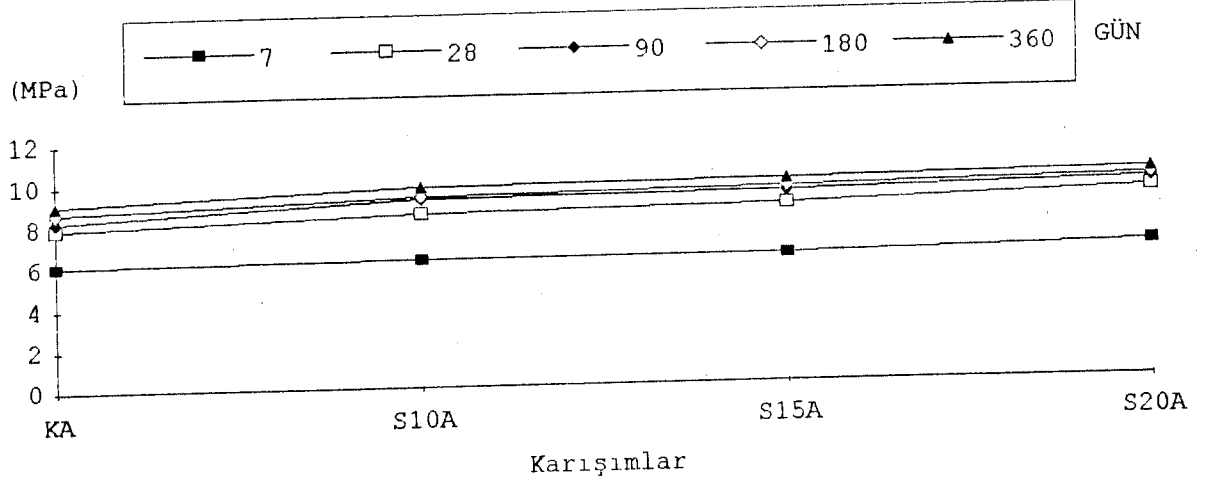
Şekil 6.5, FeSi Katkılı Harçların Eğilmede Çekme Dayanımı



Şekil 6.6, SiFeCr Katkılı Harçların Eğilmede Çekme Dayanımı



Şekil 6.7, SA Katkılı FeSi'li Harçların Eğilmede Çekme Dayanımı



Şekil 6.8, SA Katkılı SiFeCr'lu Harçların Eğilmede Çekme Dayanımı

6.3.3.3. Tartışma

PÇ, PÇ+FeSi ve PÇ+SiFeCr'lu karışımların zaman itibarıyla basınç dayanım gelişimi şöyle gerçekleşmiştir; Tablo 6.6'daki sonuçlara ve Şekil 6.1, 6.2, 6.3 ve 6.4'e göre basınç dayanımı, Tablo 6.7'deki sonuçlara ve Şekil 6.5, 6.6, 6.7 ve 6.8'e göre eğilmede çekme dayanımı SD miktarı ile orantılı olarak artmaktadır.

Kontrol numunesi 28. gün sonunda 46.3 MPa'lık basınç dayanıma ulaşırken, FeSi'li karışımlar kontrol numunesine oranla; %10 FeSi %28, %15 FeSi %31, %20 FeSi %33, %25 FeSi 38 ve %30 FeSi %39'lük dayanım artışı göstermiştir. Diğer taraftan, %10 SiFeCr %9, %15 SiFeCr %21, %20 SiFeCr %20, %25 SiFeCr %25 ve %30 SiFeCr %28'lik dayanım artışı göstermiştir.

Kontrol numunesi 1 yıl sonunda 55.8 MPa'lık basınç dayanıma ulaşırken, FeSi'li karışımlar kontrol numunesine oranla; %10 FeSi %29, %15 FeSi %34, %20 FeSi %39, %25 FeSi

%43 ve %30 FeSi %44'lük dayanım artışı göstermiştir. Diğer taraftan, %10 SiFeCr %25, %15 SiFeCr %32, %20 SiFeCr %33, %25 SiFeCr %35 ve %30 SiFeCr %41'lik dayanım artışı göstermiştir.

6.3.4. Harçlarda boy değişimine sülfat etkisi

6.3.4.1. Giriş

Sülfat eriyiklerinin çimento hamuru üzerindeki etkileri katyona ve yoğunluğa bağlı olarak değişir. Burada Na_2SO_4 ve MgSO_4 etkilerini içeren bazı reaksiyonlar ve korozyon mekanizmaları kısaca ele alınacaktır.

Çimentoların sülfat etkisine uğratılması ile ilgili kimyasal reaksiyonlar ve prosesler, aynı zamanda betona etkileri, sülfatların, çimento ve betonların yapısı başta olmak üzere, tuzların konsantrasyonuna, dış koşullara ve zamana bağlıdır.

Sülfat karışımlarının etkisi her zaman beklenmez ve eğer katkı değillerse önceden bilinmezler. Buna karşılık, Na_2SO_4 ile MgSO_4 katkıları için "eksitici" (subtractive) veya tam tersine bu iki tuz yalnız başına etki ederken etkilerini azaltıcı olabilir (Reading, 1975). SO_4^{-2} iyonlarının hidrate çimento pastasında yayıncabilirliği doygun kireç çözeltisinden daha büyüktür. Bu durum, sertleşmiş çimento pastasının anyonlarına yayınmasını yapılarına bağlı olarak kolaylaştıran yarı geçirgen membran gibi davrandığını gösterir (Ushiyama ve Goto, 1974; Kondo ve Ushiyama, 1974; Ushiyama vd, 1976). Bu nedenle, SO_4^{-2} iyonlarının yayınma hızı, her seferinde farklı yapı ve çözünürlükte ürünler oluştuğu için sülfat etkisinden daha zayıftır (Ushiyama vd, 1975).

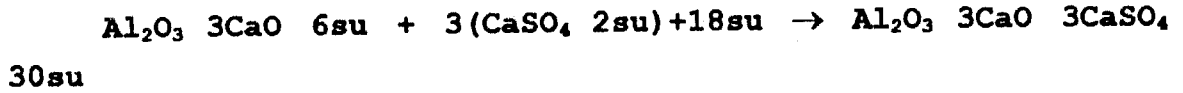
Sülfat etkisi, kalsiyum alüminatlar üzerinde yoğunlaşır. Bunun yanında, çimentonun sülfat etkisine karşı duyarlılığı içindeki C_3A miktarına bağlı olmasına rağmen, orta ve yüksek oranlarda C_3A içeren çimentoca zengin karışımlarının, sülfatlı sulardan, düşük C_3A 'lı çimentodan hazırlanan

betonlara kıyasla daha az etkilediği konusunda bazı görüşler mevcuttur (Schramli, 1979).

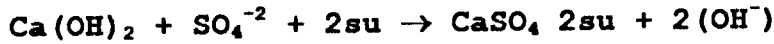
Bir portland çimentosunda bulunan karmaşık bileşimlerden C₃A hidratasyon sonunda kararlı olarak



formülüne sahip trikalsiyum alüminat hidrateyi meydana getirir. Bu cisim üzerinde suda bulunan CaSO₄ 2su'nun etkisiyle aşağıdaki reaksiyona göre bir sülfoalüminat tuzu veya CANDLOT tuzu meydana getirir.



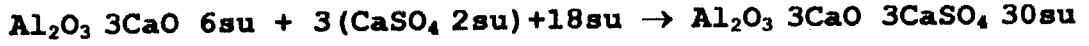
Bu CANDLOT tuzunun içinde 30 molekül suyun bulunması önemli ölçüde bir hacim artmasına neden olur. Bu hacim artmasının meydana getirdiği çekme gerilmelerinin etkisiyle betonun dayanıklılığı azalır ve olayın gelişmesi sonunda da beton parçalanır. Ayrıca sülfatlı sular, hidratasyon sonunda meydana gelen Ca(OH)₂'yi şu şekilde etkiler.



Bu reaksiyon sonunda meydana gelen CaSO₄ 2su yine bir miktar hacim artırır. Bunun CANDLOT tuzuna eklenmesiyle zararlı etki daha da artar.

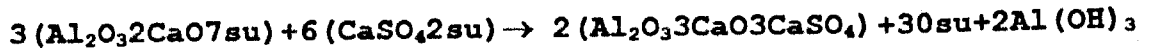
Al₂O₃ 3CaO 3CaSO₄ 30su bileşimine sahip doğada etrenjit adı verilen bir mineral vardır. 1874 yılında Lemann tarafından keşfedilen bu mineralin birim ağırlığı 1.70-1.75 g/cm³ arasındadır. Mineraldeki alüminyum atomlarının yerini demir atomları kolaylıkla alabilir. Çimentonun içinde bir miktar alçının bulunmasından dolayı etrenjit sertleşme esnasında da oluşmaktadır. Hidratasyon sırasında meydana gelen etrenjit veya CANDLOT tuzu miktarının sınırlı olmasından ve başlangıçta betonun deformasyon yapma kabiliyetinin büyük olmasından dolayı bir zarar meydana

getirmemektedir. Fakat, beton yeterli dayanım kazandıktan sonra sudaki sülfatların etkisiyle



denklemine göre oluşan sülföalüminat tuzunun çok büyük tahrip kuvveti vardır.

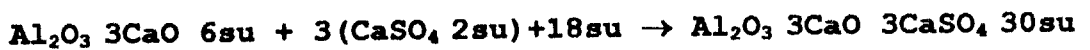
Alüminli çimentolar CaSO_4 'den hiç zarar görmezler. Bunun nedeni; bu çimentonun esas karmaşık bileşimi olan $\text{Al}_2\text{O}_3\text{CaO}$ 'nun hidratasyonu sonunda alüminat bikalsit hidratenin meydana gelmesidir. $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{CaO} \cdot 7\text{su}$ formülüne sahip bir hidrate eleman üzerinde CaSO_4 aşağıdaki denkleme göre reaksiyon yapar:



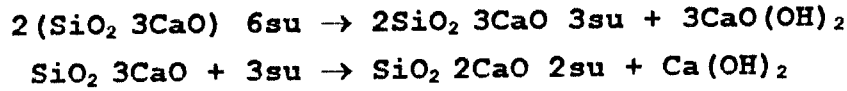
Bu reaksiyon sonunda meydana gelen sülföalüminat kristali betonun boşluklarını doldurarak kompasesini artırır. Bu bakımdan zarar yerine faydalı bir etki yapar.

Puzolanlı çimentolarda CaSO_4 'lı çözeltilere karşı PÇ'ye göre daha büyük bir dayanıklılık gösterir. Bunu Lafuma'nın bir teorisine dayanarak şu şekilde açıklamak mümkündür. Genel olarak katılaşıp bir çimento içinde bulunan katı eleman, çözelti içindeki bir madde ile birleşirse daima bir genleşme gerçekleşir. Fakat, eğer katı cisim içindeki madde çözelti haline geçtikten sonra reaksiyon yaparak bir birleşme söz konusu olur ise hiç bir genleşme meydana gelmez. Kireçli doygun bir çözeltilde PÇ içinde bulunan kalsiyum alüminat hidratenin çözünme kabiliyeti son derece azdır. Fakat, çözeltilde kireç miktarının azalmasıyla bu maddenin çözünürlüğü artmaktadır.

Normal portland çimentosunun sülfatlı sulara karşı durumu, çimentonun içinde bulunan karmaşık bileşimlerin miktarı ile birlikte önemli değişiklikler göstermektedir.



denklemine göre, olaya kalsiyum alüminat hidrate neden olmaktadır. Bunu meydana getiren C_3A çimento içinde ne kadar fazla bulunuyorsa CANDLOT tuzu o kadar fazla miktarda meydana gelecek, sülfatlı suların zararlı etkisi de o oranda yüksek olacaktır. Diğer karmaşık bileşimlerden C_3S 'in hidratasyonu sonunda



denklemlerinde görüldüğü gibi fazla miktarda $Ca(OH)_2$ 'nin meydana gelmesi bu karmaşık bileşimi çimentonun sulara ve bu arada sülfatlı sulara karşı dayanıklılığın azalmasına büyük bir rol oynamaktadır.

Bu açıklamalardan da anlaşılacağı üzere, sülfatlı sulara dayanıklı olması istenen bir PÇ'de C_3A ile C_3S miktarlarının sınırlandırılması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu konuda yapılan çok sayıda araştırmalara dayanarak muhtelif kriteriyumlar ortaya atılmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi fazla sülfat içeren deniz suyu içinde bulunacak betonlarda kullanılacak çimento Fransız COPLA standardına göre şu koşulları aynı zamanda yerine getirmelidir.

$$C_3A \text{ (miktarı)} + 0.27 C_3S \text{ (miktarı)} \leq \% 23.5$$

$$C_3A \text{ (miktarı)} < \% 10$$

Bu koşullarda C_3A miktarı maksimum değer olan 0.10 değerini aldığı zaman C_3S 'in %50'den küçük olması gerekiyor. Başka bir deyişle; deniz yapılarına dayanıklı betonlarda kullanılacak çimentolarda C_3S %50 değerini geçmemelidir.

ASTM standardının bu konuda ileri sürdüğü koşullar ise şöyledir:

$$C_3A \text{ (miktarı)} + C_3S \text{ (miktarı)} \leq \% 58$$

$$C_3A \text{ (miktarı)} \leq \% 8$$

Bu iki koşul tabiatıyla aynı zamanda gerçekleşmelidir. Açıklanan bu iki kriteriyumun birbirinden pek farketmediği kolaylıkla anlaşılmaktadır. Deniz suyunda sülfattan başka bulunan tuzlar sülfatların zararlı etkisini belirgin bir ölçüde azaltmaktadır. Suda yalnız sülfatın bulunması halinde zararlı etki daha fazla olduğundan koşullar daha da ağırlaştırılmaktadır. Öneğin; C_3A miktarının %5'i geçmemesi istenmektedir. Yukarıdaki kriteriyumlarda yer alan C_3S ve C_3A miktarları

$$C_3S = 4.07 CaO - 7.06 SiO_2 - 6.72 Al_2O_3 - 1.43 Fe_2O_3 - 2.85 SO_3$$

$$C_3A = 2.65 Al_2O_3 - 1.69 Fe_2O_3$$

denklemleriyle hesaplanması önerilmektedir.

Sülfatlı suların zararlı etkisinde rol oynayan bir başka faktör de, sülfatın konsantrasyon derecesidir. Çözeltide fazla miktarda sülfat bulunuyorsa meydana gelecek CANDLOT tuzunun miktarı büyük olacaktır. Bunun sonucunda, beton kısa zamanda harap olacaktır. Çözeltide sülfat miktarının çok az olması ise herhangi bir zararlı etkiye neden olmayacaktır. Bu konuda yapılmış olan çalışmalarda suların hareketli olması halinde, eriyikte muhtelif SO_4 miktarının etkime şekli Tablo 6.8'de verilmiştir.

Tablo 6.8, Sülfat Miktarının Kritik Değerleri

Etkime Şekli	Zeminde, Su İçinde Çözünebilen SO_4 Miktarı (%)	Sudaki SO_4 Miktarı (g/lt)
Pratik Olarak Yok	0.00-0.10	0-0.10
Etkime Var	0.10-0.20	0.15-1.00
Önemli	0.20-0.50	1.00-2.00
Şiddetli	0.50'den fazla	2.00'den fazla

Bilindiği üzere, $CaSO_4$ 'ün %70'si SO_4 'tür. Buna göre, suda çok az çözünmesine rağmen (1 lt'de 2 g çözünebilir) 1

1t suda 0.21 g'dan fazla bulunuyorsa zararlı etki başlamaktadır. Hareketli sular için verilen yukarıdaki değerleri durgun sularda uygulamak doğru değildir. Zira, durgun sular yenileşmediğinden belirli bir miktar SO_4 çimento ile reaksiyon yaptıktan sonra olay gelişmeyecektir. Bu nedenle, hareketsiz sularda zararlı etki sudaki sülfat konsantrasyonunun daha büyük bir değere ulaşması halinde başlayacaktır. Yapılmış olan bazı araştırmalara dayanarak Tablo 6.8'deki miktarları %50 arttırmak suretiyle durgun sular için kullanılabilir. Buna göre, bataklık vb sularda sülfat miktarı 1t'de 225 mg'ı geçince zararlı etki kendini gösterebilir.

Sülfatlı suların zararlı etkileri aynı zamanda sülfatın çeşidine de bağlı bulunmaktadır. Tablo 6.8'deki değerler $CaSO_4$, Na_2SO_4 , K_2SO_4 ve benzeri sülfatlar gözönünde tutularak verilmiştir. $MgSO_4$ şeklinde olması zararlı etkiyi, önemli derecede olmak üzere, iki katı arttırdığını bu konuda yapılan deneyler göstermektedir. Buna göre, Tablo 6.8'de verilen değerlerin yarısını almak suretiyle $MgSO_4$ çözeltileri için uygulayabilir. Böylelikle 1 lt'de 0.10 g $MgSO_4$ 'ün bulunması ile zararlı etki kendini belli etmektedir. Fakat, doğada içinde $MgSO_4$ bulunan sulara az rastlanılmaktadır.

Sülfatların kritik değerlerinin değişebileceği, aşağıdaki hususlar gözönünde tutularak düşünülmelidir:

- Suyun buharlaşması ile sülfatın konsantrasyon derecesinde önemli artışlar olur. Bunun sonunda, genel olarak suların serbest yüzeye yakın kısımlarındaki sülfat miktarında belirli bir yükselme vardır. Bu nedenden dolayı, betonun serbest su yüzeyinin hemen altında kalan kısmı ile temas eden beton sülfatların etkisinden daha fazla zarar görmeye olverişlidir.

- Sülfatlı sular, betonun içerisine girerek, kılcal boşluklarda ilerleyerek, yapının üst kısımlarına ulaşır. Buralarda suyun önemli miktarda buharlaşması sonunda sülfat konsantrasyonunda büyük bir artış meydana gelebilir. Bu suretle, başlangıçta zararlı bir etkiye sahip bulunmayan

bir su kılcallık olayı sonunda beton için tahrip edici bir karakter kazanabilir.

- Suda sülfattan başka klorürlerin bulunması sülfatların reaksiyonunda bir yavaşlamaya neden olması ile zararlı etkiyi önemli derecede azaltır.

Sülfatlı suların etkisiyle meydana gelen arızaların etrenjit'ten farklı başka sülfatlı karışımdan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Bu karışım:



formülü ile bilinen thaumasite (tomasit)'dir. Birim ağırlığı 1.87 g/cm^3 olan bu mineralin meydana gelmesiyle C_3A 'nın bir etkisi bulunmamaktadır. Bu maddenin oluşmasında asıl etken jips ve ortamdaki su içindeki sülfat miktarıdır. Bu maddenin meydana gelmesinde elverişli koşullar; ortamın rutubetli olması, sıcaklık derecesinin $+4^\circ\text{C}$ civarında bulunması, çimentoda ki alümin miktarının %1-4 arasında olması ve jipsinde %1'den daha büyük değer olmasıdır. Bu koşulların gerçekleşmesi halinde thaumasite oluşabilir ve iki hafta gibi çok kısa bir zamanda, betonu tahrip edebilir (Postacıoğlu, 1986).

Pek çok ülkede, deniz suyu ve karbonik asit gibi etkilere karşı dirençli çimentolar üretilmekte ve standardlaştırılmaya çalışılmaktadır. Genel olarak, PÇ'nin kimyasal direnci için standard özellikler sorunu, diğer çimentolar için getirilen öneriler ile de bağlantılıdır.

PÇ'den başka, puzolanlı çimentolar kullanıldığında bazı hususlar farklı olmaktadır. Günümüzde bir çok ülke yüksek oranda puzolanlı çimentoları kullanmaktadır. Bunların bulunmadığı zaman uçucu küllü veya daha elverişli olarak yüksek fırın curufllu çimentolar kullanılmaktadır. Bu da bahsedilen çimento tiplerinin hiçbirini kullanmamış gözlemcinin karar vermesini güçleştirir. Bu durum, yukarıda bahsedilen her bir çimentonun aşındırıcı ortama karşı farklı özellikler göstermesi nedeniyle daha da güçleşir. Bunu

kolaylaştırmak, bu çimentolardan birinin kullanımını genelleştirmek mümkündür.

Aslında sülfata karşı az veya çok dirençli çimentolarla hazırlanan betonların sülfat etkisini açıklamak çok güçtür. Buna karşılık, bu olay hem laboratuvar hem de pratikte aynı sonuçları verebilmektedir. Bundan başka, düşük C_3A ve C_4AF 'li puzolanik çimentolar, dolayısıyla az su gereksinimi olan bazı puzolanlar, betonun sülfata karşı daha iyi dayanım göstermesini sağlarlar. Bütün bu olaylar, PÇ'lerin sülfata karşı dirençi konusunda, C_3A ve C_4AF içeriğini daha dar limitler arasında almanın önemli olup olmadığı sorusunu akla getirmektedir (Scharamalı, 1978; Kalousek vd. 1972).

Sülfata karşı dirençli çimentolar konusunda son çalışmalardan biri, 1977 yılında yapılan ve bu konuda geniş bir rapor olarak yayınlanan çalışmadır. Bu yayında, sülfata dirençli beton istendiğinde mutlaka sülfata dirençli çimento kullanılmasının gereği, standartlar ve yayınlanan kaynaklarda öyle fazla belirtilmemesine rağmen, çimentoların faz bileşiminin betonun sülfata karşı dayanımında pek önemli bir etkisi olmadığı düşüncesi ileri sürülmüştür (Helmut, 1977).

Çimentoyu sülfata karşı daha dayanıklı hale getirmek için, PÇ'deki C_3A içeriğinin limitlerini ayarlamayı dayanıklılıktan ziyade, çimento üretimi, çimento özellikleri ve davranışları için de düşünülebileceğini gösterir. Bu yüzden, çimento standartlarında C_3A miktarının limitlerini saptamak, çok dikkatle üzerinde durulması gereken bir konudur (Schramli, 1978). Diğer taraftan, standartlarda C_3A ve/veya $x C_3A + y C_4AF$ ve/veya C_3S miktarlarına sınırlama getirirken klinkerin pişme ve soğutma koşullarına etkileri gözönüne alınmamaktadır (Nadu, 1974).

Buraya kadar anlatılanlara göre; çimentoların sülfat direnci konusunda, alüminat fazlarının büyük önem taşıdığını vurgulamaya çalışılmıştır. Bununla birlikte, ferrit fazları da etkilenmektedir. Klinkerin C_3A ve ferrit fazı miktarındaki farklar bakımından sülfat etkisinin

kimyasını tartışırken üzerinde durulması gereklidir (Kalousek, 1976; Helmut, 1976).

PÇ'nin sülfata karşı direnci konusunda, kimyasal bileşim açısından, farklı izah şekilleri vardır. Daha özel olarak, A/F oranlarıyla ve C_3A ve/veya $x C_3A + y C_4AF$ ile ve bazen de C_3S miktarıyla ilişkili olmaktadır.

Yukarıda verilen COPLA ve ASTM sınırlamaları, çimentodaki C_3A 'nın farklı kristal formlarında bulunmasının üzerine etkisi hakkında bir kritik yapmayı amaçlamaktadır. Bu nedenle, C_3A üzerinde durmadan betonun etkiye maruz kalması hakkında düşünmek imkansız gibi görünür. C_3A 'nın kübik, ortorombik ve tetragonal formları deniz suyu ile farklı şekillerde reaksiyona girmektedir. Kübik C_3A daha fazla oranda etrenjit, brusit ve jips oluştururken, tetragonal C_3A , MSH oluşumunun diğer iki forma göre daha az oranda gerçekleşmesine neden olur (Schramli, 1978).

C_4AF sınırları konusunda, demir bileşenlerince zengin çimentonun magnezyum sülfat etkisine karşı daha dayanıklı olduğu şeklindeki görüş dikkate alınmaktadır (Helmut, 1975).

Yüksek oranda (%50'nin üzerinde) curuf veya doğal puzolan veya uçucu kül içeren çimentolar dayanıklılık konusunda uygun olabilir. Bu tür maddelerin mekanizmaları arasında en yaygın olanı, çimentonun klinker kısmının seyrelmesi ve C_3A , C_4AF ve farklı yapılarda C-S-H oluşumudur. Spesifik mekanizmalar, puzolanik ve uçucu küllü çimentolar bulunduğunda tüm $Ca(OH)_2$ 'nin sabitleşmesi olduğu kadar, $Ca(OH)_2$ 'nin doygun çözeltilerinin oluşumunun engellenmesini; yüksek fırın curufllu çimentolarda daha az $Ca(OH)_2$ dalayısıyla daha az jips ve etrenjit oluşumunu temel almıştır. Böylece, tuz etkisinde (klorür, deniz suyu) curufllu betonların performansı genelde, PÇ'den daha iyidir (Yoda, 1976). Curufllu çimentolar deniz suyuna maruz bırakıldıklarında, açık havada kalmalarına oranla, daha iyi özellik gösterirler. Benzer şekilde, PÇ'lerin bileşimi için çimento standartlarında verilen limitler, sülfatlı su ve

toprakların aşındırıcılık derecelerine göre çok değişken olup, ayrıca ölkelere ve organizasyonlara bağlıdır.

6.3.4.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

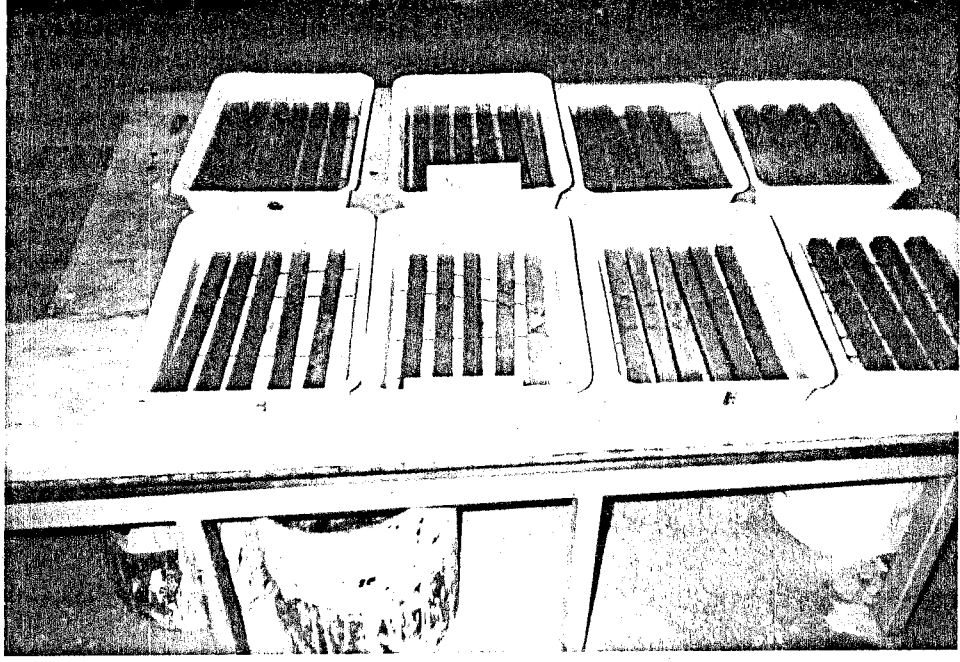
Sertleşmiş harçlarda sülfat direnç i deneyi (Fotograf 6.4) TS 3322, ASTM C490-86 ve ASTM C 1012-87 esasına göre yapılmış olup elde edilen sonuçlar Tablo 6.8'de verilmiştir. Herbir karışımın sülfat direnç i sonuçları 25x25x285 mm boyutundaki prizmatik çubuklar üzerinden alınmıştır.

ASTM C1012-87'de belirtilen esaslar çerçevesinde 1., 2., 3., 8., 13., 24., 36. ve 48. haftalarda boy ölçüm işlemine tabi tutulmuştur. Karışımın yarısı suda, diğ er yarısı ise Na₂SO₄ çözeltisinde korunmuştur (Fotograf 6.2).

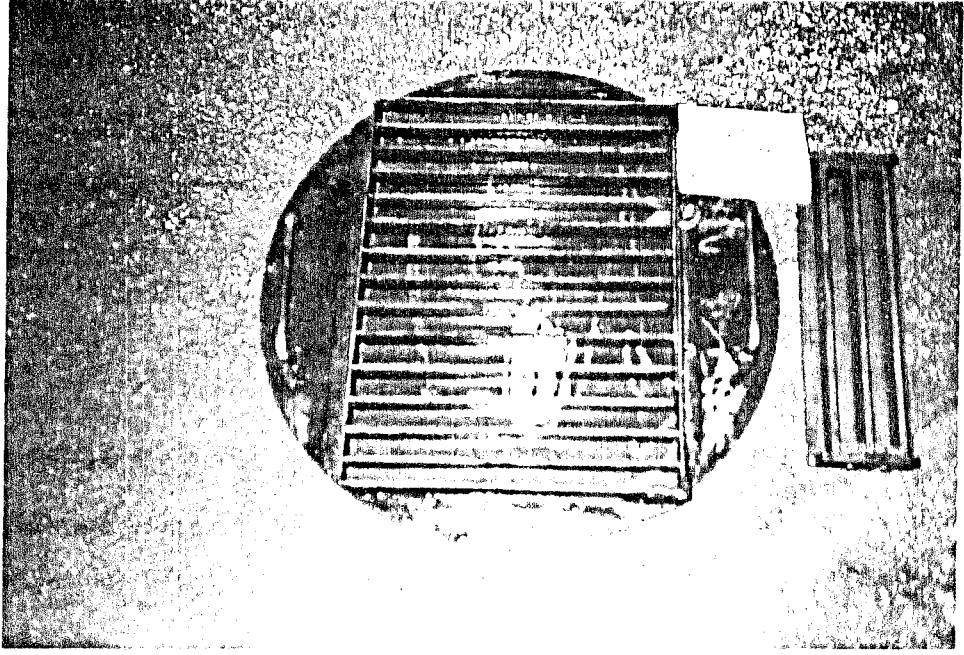
Aynı karışım dan 70±1 mm. boyutunda ve her karışım dan 4 numune olmak üzere küp numuneler hazırlanmıştır. Küp numunelerin 20 MPa'ya ulaştığı zaman (6. günde) bar çubukların yarısı Na₂SO₄ çözeltisinde korunarak boy ölçümlerinin alınmasına başlanmıştır. Tüm karışım larda 24 saatlik kür süresi sonunda numuneler üzerinden ilk boy ölçümü alınmıştır.

Boy değişimi, karışım larin başlangıçtaki boyu ile belirli bir yaştaki boyu arasında ölçüm sonucu bulunan boy uzaması veya kısılmasıdır. Boy değişim oranı ise, karışım larin boy değişiminin başlangıç boyuna oranıdır. ASTM C1012'de sülfat etkisindeki harç çubukların nın %0.2'den daha fazla boy değişimine uğramamaları istenir.

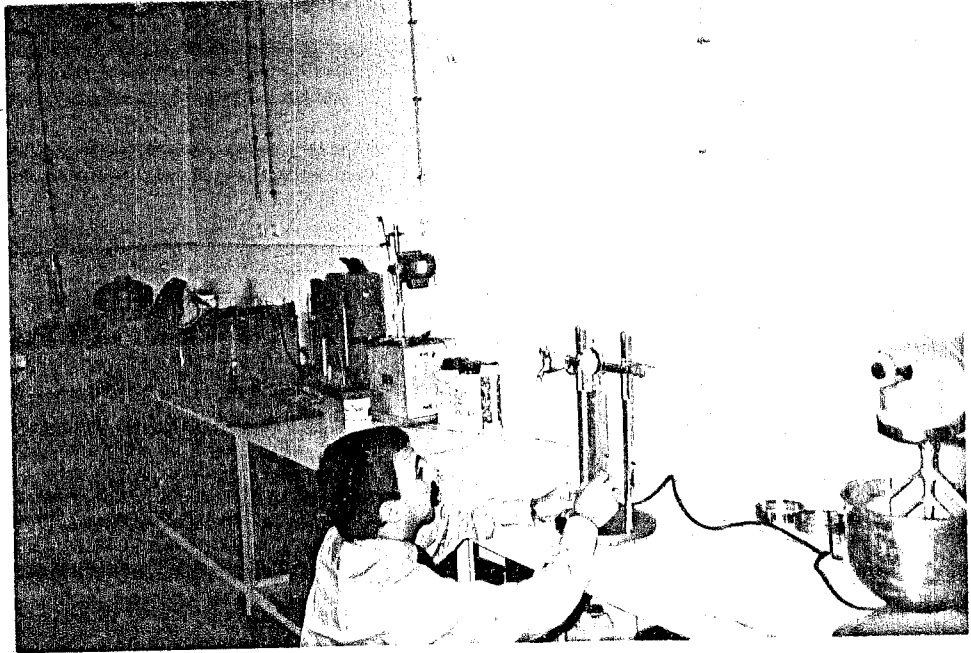
PÇ, PÇ+FeSi ve PÇ+SiFeCr karışım larin nın konulduğu kalıp (Fotograf 6.3) ve ölçüm çivileri F.Ü. Teknik Eğitim Fakóltesi Metal Eğitim Bölümü ve Elazığ Meslek Yüksek Okulu Makine Programı Atelyeleri'nde TS 3322 esasına göre üretilmiştir. Üretilen kalıp ile aynı anda 14 adet 25x25x285 mm boyutunda prizmalar dökülebilmektedir.



Fotograf 6.2, Boy Değişim Deneyine Tabi Tutulan Numuneler



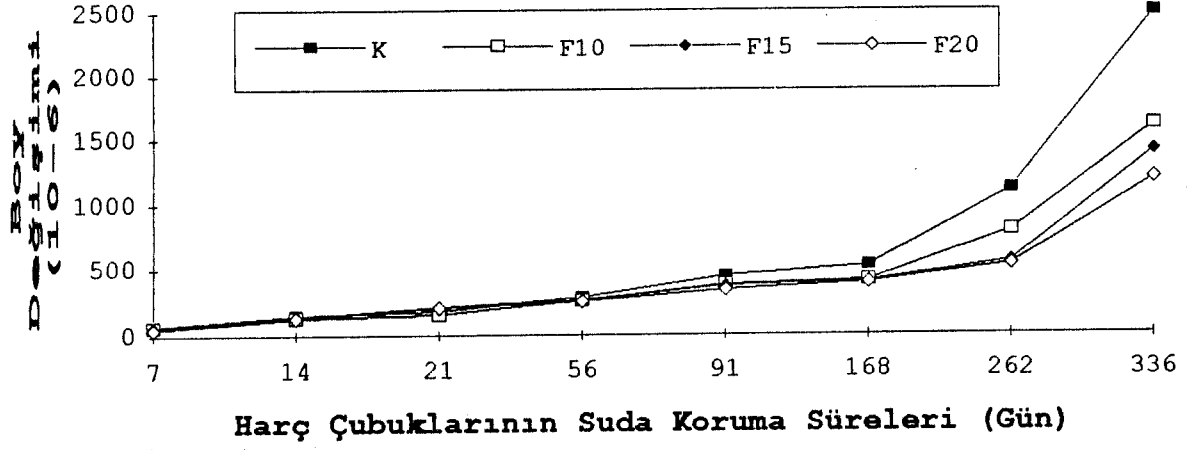
Fotograf 6.3, Boy Değişimi İçin Yapılan Kalıp



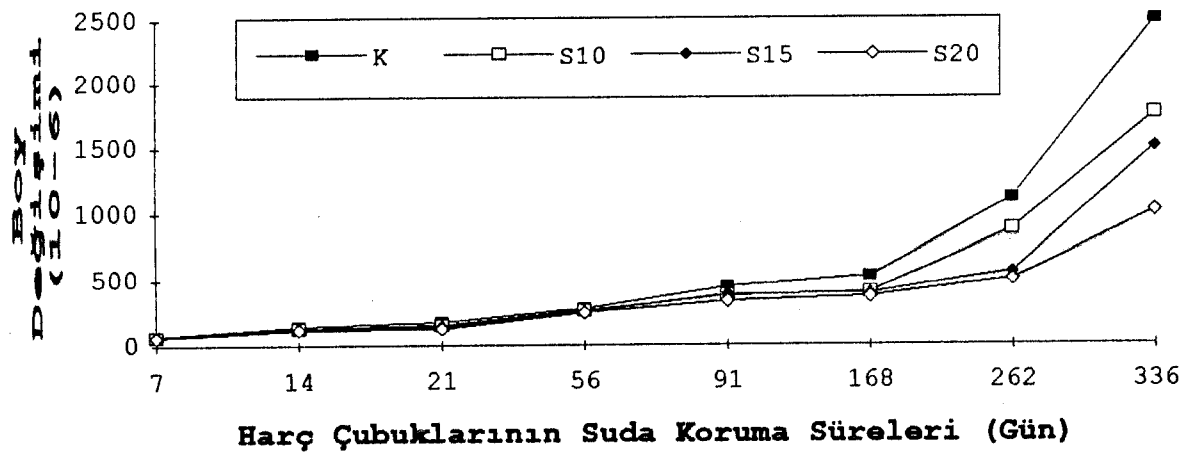
Fotograf 6.4, Boy Değişim Deneyi Uygulaması

Tablo 6.9, Boy Değişimine Sülfat Etkisi Deney Sonuçları

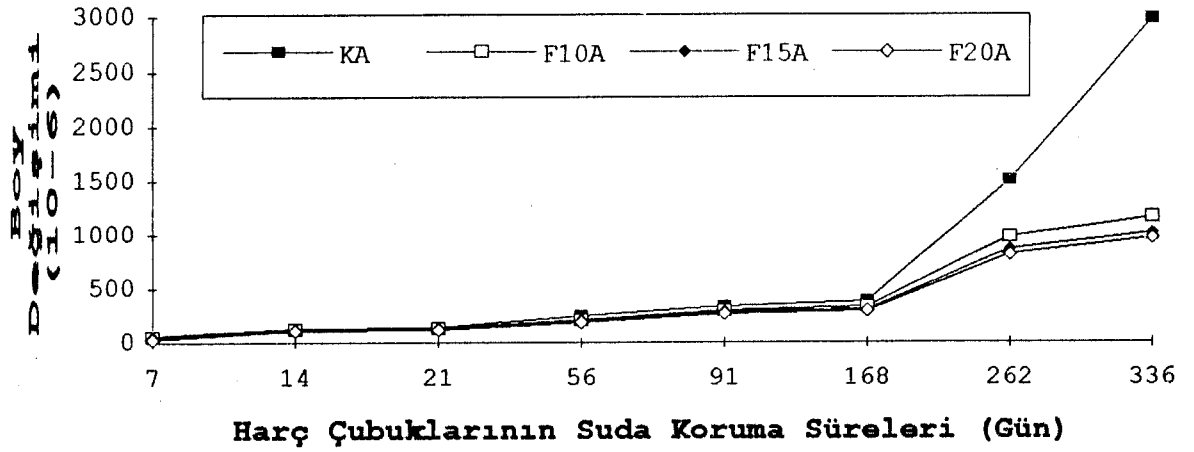
		Boy Değişimi (10^{-6}) (Gün)							
Karışımlar ve Koruma Ortamı		7	14	21	56	91	168	262	336
K	Su	70	140	175	280	450	530	1120	2500
	Na ₂ SO ₄	85	180	230	360	800	1400	2600	4900
F10	Su	60	130	150	260	380	410	800	1610
	Na ₂ SO ₄	75	170	220	340	710	1100	1450	1840
F15	Su	65	125	210	255	370	405	560	1410
	Na ₂ SO ₄	80	170	225	350	760	1250	1690	1740
F20	Su	50	125	205	250	340	400	540	1200
	Na ₂ SO ₄	60	150	190	320	610	1110	1460	1580
S10	Su	65	130	155	270	380	405	880	1760
	Na ₂ SO ₄	80	175	205	350	765	1040	1410	1860
S15	Su	65	120	145	260	390	400	560	1510
	Na ₂ SO ₄	70	170	200	330	750	980	1360	1650
S20	Su	60	120	130	250	340	375	505	1020
	Na ₂ SO ₄	60	165	190	305	710	910	1250	1560
KA	Su	60	120	130	240	330	790	1510	2980
	Na ₂ SO ₄	80	160	200	290	650	1280	1960	3120
F10A	Su	50	110	120	205	290	330	980	1160
	Na ₂ SO ₄	70	140	135	285	560	750	1100	1400
F15A	Su	45	105	115	200	280	300	860	1020
	Na ₂ SO ₄	70	130	135	270	540	670	960	1180
F20A	Su	30	100	110	180	265	290	810	970
	Na ₂ SO ₄	55	120	125	250	460	640	905	980
S10A	Su	55	115	125	210	305	365	1100	1350
	Na ₂ SO ₄	75	145	150	310	605	780	1240	1610
S15A	Su	45	110	120	200	290	355	960	1240
	Na ₂ SO ₄	70	140	140	300	600	740	1160	1380
S20A	Su	35	105	110	180	265	350	940	1020
	Na ₂ SO ₄	60	120	125	270	550	720	1040	1165



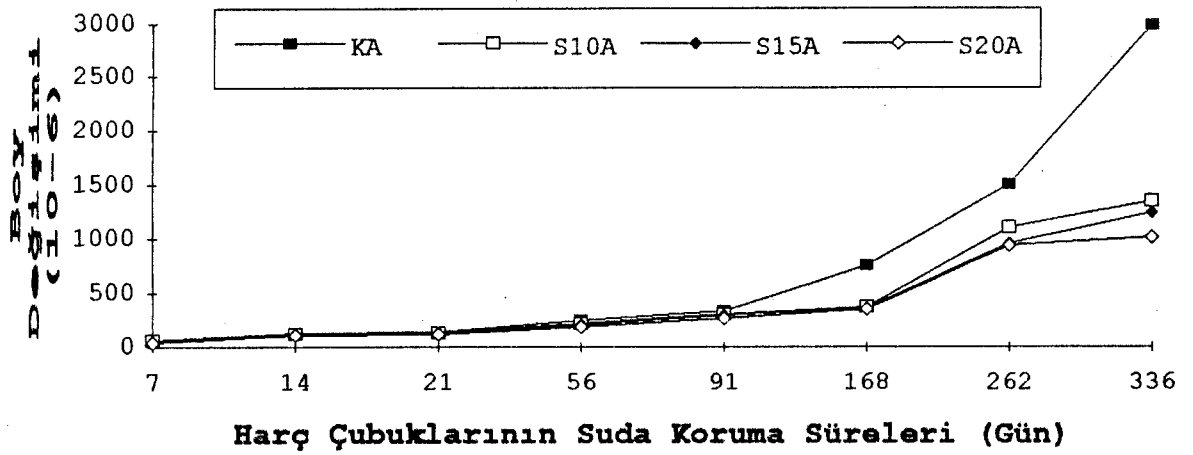
Şekil 6.9, Suda Korunan FeSi Katkılı Harçların Boy Değişimi



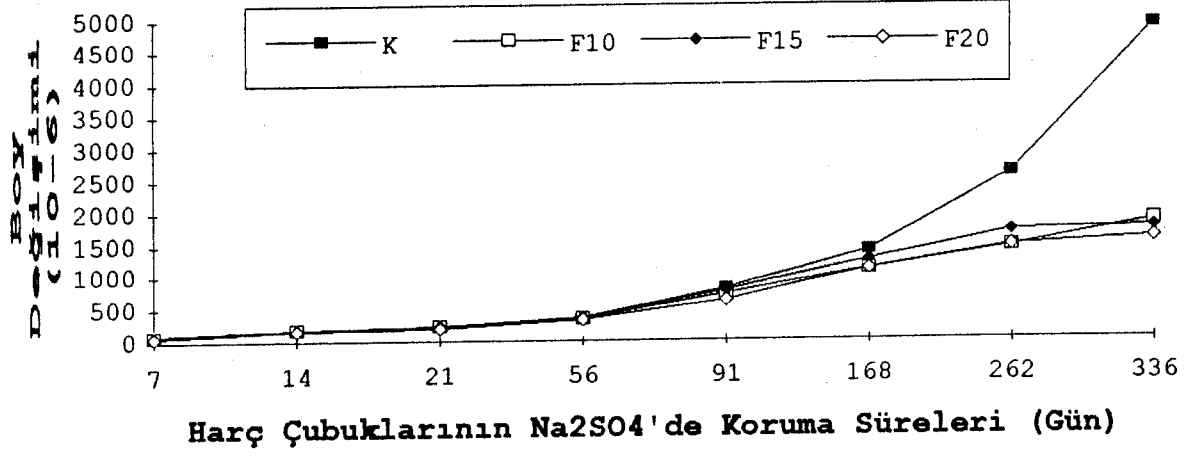
Şekil 6.10, Suda Korunan SiFeCr Katkılı Harçların Boy Değişimi



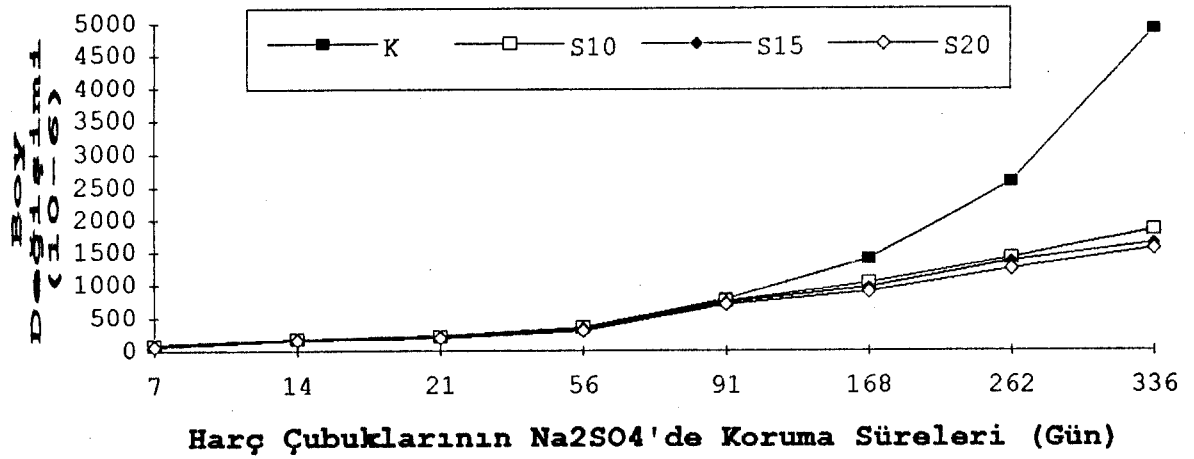
Şekil 6.11, Suda Korunan SA Katkılı FeSi'li Harçların Boy Değişimi



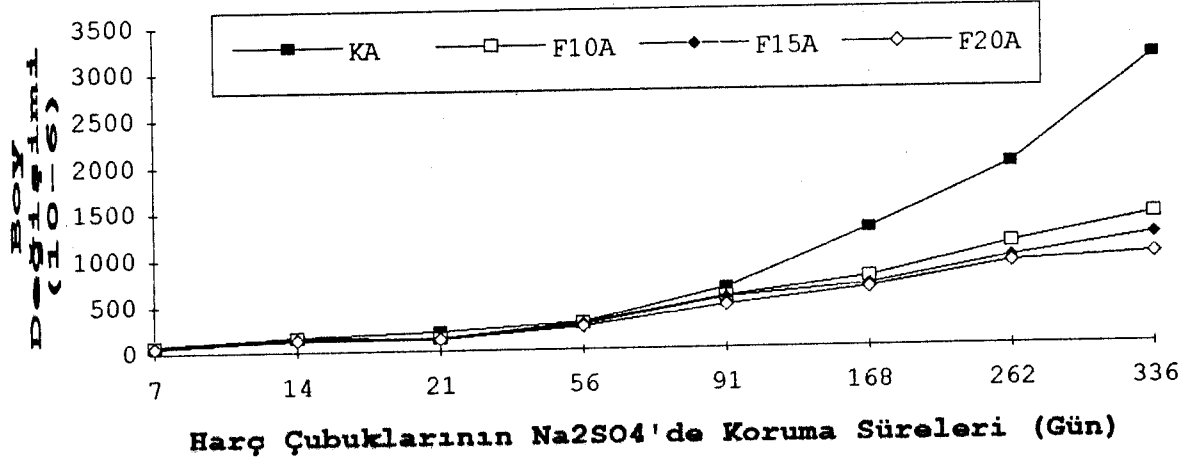
Şekil 6.12, Suda Korunan SA Katkılı SiFeCr'lu Harçların Boy Değişimi



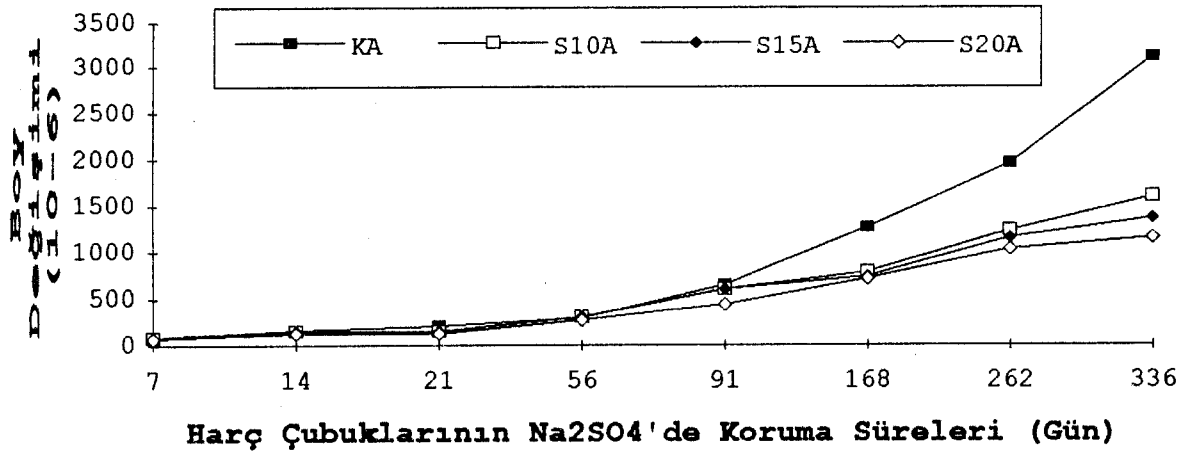
Şekil 6.13, Na₂SO₄ Çözeltisinde Korunan FeSi Katkılı Harçların Boy Değişimi



Şekil 6.14, Na₂SO₄ Çözeltisinde Korunan SiFeCr Katkılı Harçların Boy Değişimi



Şekil 6.15, Na₂SO₄ Çözeltisinde Korunan SA Katkılı FeSi'li Harçların Boy Değişimi



Şekil 6.16, Na₂SO₄ Çözeltisinde Korunan SA Katkılı SiFeCr'lu Harçların Boy Değişimi

6.3.4.3. Tartışma

PÇ, PÇ+FeSi ve PÇ+SiFeCr'lu harç çubuklarının zaman itibarıyla boy değişimi şöyle gerçekleşmiştir;

Şekil 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15 ve 6.16'da da görüleceği üzere, gerek su ve gerekse Na_2SO_4 ortamında 336 gün korunan Kontrol harçları %0.2'den daha büyük boy değişimine maruz kalmıştır. Diğer taraftan SD katkılı tüm harçlar Kazuyuki ve Kawamura (1994) ve Hooton'nın (1993) yapmış oldukları deneylerde olduğu gibi %0.2'den daha az boy değişimine maruz kalmışlardır.

S/B oranının 0.40 düzeyinde tutulması durumunda boy değişimi normal kıvama (Folw: ~105-115) göre hazırlanan karışımlara oranla daha az olmuştur. Normal kıvama göre hazırlanan harç çubuklarının tüm karışım oranlarında özellikle 90. gününden sonra boy değişimi belirginleşmiş olup, bu olay S/B oranı 0.40 olan numunelerde daha azdır. Na_2SO_4 'ün suya göre yıpratıcı etkisi daha fazla olmuştur. Harçlarda FeSi ve SiFeCr'un kullanılması durumunda boy değişiminde düşme olmaktadır.

7. BETON ÜZERİNDE YAPILAN DENEYLER VE SONUÇLARI

7.1. Kıvam

7.1.1. Giriş

Betonun işlenebilme özeliğinin hakiki değeri ölçülememektedir. Bu amaçla kıvamı belirleyen bazı yöntemler kullanılır. Çökme Hunisi Metodu bunlardan biridir.

Su miktarında değişiklik, agregâ özellikleri ve granülometrisi, çimento özellikleri ve hamur yüzdesi, katkı maddeleri gibi faktörler taze betonun kıvamı ile birlikte çökme değerini de etkiler. Bu sonuçlar karşısında, çökme deneyinin ancak kıvamı belirten, su miktarının durumunu açıklayan bir metod olduğu kabul edilebilir. Çökme miktarının büyük değerler alması, karma suyun fazla miktarda bulunduğu ve taze betonun kendi ağırlığı altında hareket etme kabiliyetinin büyük olduğunu ifade etmektedir. Bu bakımdan çökme miktarı ne kadar fazla ise taze betonun işlenebilme özeliğinin derecesi de o kadar yüksek olduğu kabul edilmiştir.

7.1.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Kıvam deneyi için hazırlanan taze beton karışım oranları Tablo 4.5'den alınmış olup, kıvam deneyleri TS 2871 Çökme Hunisi Metodu esasına göre yapılmıştır. Taze beton karışımları kesik koniye 3 aşamada ve her aşamada 16 mm çapında bir çelik çubuk ile yerleştirilir. Üst çapı 10 cm, alt çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan kalıp tamamen doldurulduktan sonra, taze betonun üst yüzü mala ile düzeltilir. Huni, yukarı doğru düşey doğrultuda yavaş bir

şekilde kaldırıldıktan sonra, taze betonlar kendi ağırlığında bir miktar çökme yapar. Kendi ağırlığı altında yapmış olduğu çökme miktarı (mm) ölçülür. Bulunan değere göre betonun işlenebilme özeliği değerlendirilir. Deney sonuçları Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.1, Kıvam Deneyi Sonuçları

Karışımlar	Çökme (mm)	Çökmeyi Sağlayan S/B Oranı
K	82	0.53
F10	83	0.57
F15	86	0.60
F20	85	0.62
F25	84	0.64
F30	85	0.67
S10	82	0.56
S15	85	0.60
S20	83	0.62
S25	84	0.63
S30	83	0.66
KA	83	0.40
F10A	81	0.40
F15A	82	0.40
F20A	81	0.40
S10A	80	0.40
S15A	82	0.40
S20A	80	0.40

7.1.3. Tartışma

Beton karışım hesaplarında PÇ, PÇ+FeSi ve PÇ+SiFeCr'lu taze betonların plastik kıvamda olmaları (80 mm çökme yapmaları) hedeflenmiştir. ACI 211 esasına göre yapılan beton karışım hesaplarında bulunan 1 m³ kontrol betonları için 214 kg(lt) su, 400 kg çimento, 920 kg iri ve 810 kg ince agrega için çökme 82 mm ve bu çökme miktarını sağlayan

S/B oranı 0.53'tür. Benzer şekilde, çimentonun yerine %10 FeSi kullanılarak, 1 m³ betonun üretilebilmesi için 230 kg su, 360 kg PÇ + 40 kg FeSi, 920 kg iri ve 810 kg ince agrega için çökme 83 mm ve bu çökme miktarını sağlayan S/B oranı 0.57 olmaktadır.

FeSi ve SiFeCr'lu taze betonların karışımlarında ortalama 80 mm çökme sağlanabilmesi için (SA kullanılmaksızın) yaklaşık 1 kg SD için 1 kg ilave suya ihtiyaç göstermiştir.

7.2. Birim Ağırlık

7.2.1. Giriş

Taze betonun birim ağırlığı, belirli bir hacim içerisine sıkıştırılarak yerleştirilmiş taze betonun, birim hacmine isabet eden ağırlığını ifade etmektedir. Birim ağırlığının küçük olması, betonun içinde fazla boşluk olduğunu göstermesi bakımından önemlidir. Ayrıca, deneysel birim ağırlık hesapla bulunan değere yakın olmaz ise malzeme yoğunluklarında ve/veya tartımlarında hatalar bulunduğu anlaşılr.

7.2.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Betonun birim ağırlık deneyi için hazırlanan taze beton karışım oranları Tablo 4.5'den alınmış olup, deneyler TS 2941 esasına göre yapılmıştır. TS 2941'e göre, ölçme kabı (sıcaklığı 20±5°C'de) su ile tamamen doldurulur. Hava kabarcıklarını veya fazla suyu gidermek için üstü sıyırma levhası ile kapanır. Kabı dolduran suyun net ağırlığı %0.3

duyarlılıkla tayin edilir. Ölçme kabının net hacmi (V_k), kabı dolduran suyun net ağırlığının su birim ağırlığına bölünmesi ile hesaplanır. Taze beton, ölçme kabına, eşit hacimlerde üç tabaka halinde yerleştirilir. Daha sonra, sıyırma levhası yardımı ile sıyrılarak düzlenir. Beton dolu kap, 20 g duyarlılıkta bir terazide tartılır ve brüt ağırlıktan kabın tara ağırlığının çıkartılması sonucu kaptaki betonun net ağırlığı (W_n) tayin edilir. Taze betonun birim ağırlığı ise

$$BA = \frac{W_n}{V_k}$$

formülü ile hesaplanır.

Tablo 7.2, Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Karışımlar	Çökme (mm)	Birim Ağırlık (t/m^3)
K	82	2.30
F10	83	2.36
F15	86	2.37
F20	85	2.34
F25	84	2.34
F30	85	2.34
S10	82	2.36
S15	85	2.38
S20	83	2.36
S25	84	2.39
S30	83	2.40
KA	83	2.35
F10A	81	2.40
F15A	82	2.38
F20A	81	2.36
S10A	80	2.40
S15A	82	2.37
S20A	80	2.38

7.2.3. Tartışma

Tablo 7.2'deki sonuçlara göre kontrol betonun birim ağırlığı (2.3 t/m^3) çıkmıştır. Bu bir deney hatasından veya tartımlardan kaynaklanmış olabilir. SD oranı ile birlikte birim ağırlıklarının artması betonun içindeki boşlukların giderek azaldığını ifade etmektedir.

7.3. Sertleşmiş Betonların Bazı Temel Özellikleri

7.3.1. Giriş

Postacioğlu'na (1987) göre, betonların fiziksel özellikleri, bağlayıcı maddelerin devamlı bir şekilde hidratasyon yapması sonunda, zamanla beraber bir gelişme ve değişme gösterir. Bundan dolayıdır ki, sertleşmiş betonun belirli bir özeliğin hangi güne ait olduğu belirtilmelidir. Ayrıca, hidratasyon olayının hızı zamanla azaldığından, yaş ilerlemiş betonların özelliklerinde zamanla az değişme olur ve bu betonlar doğal bir malzemenin iç yapısına, karakterine sahip olmaya başlar. Beton üretildikten ve en az 5 yıl geçtikten sonra özellikleri aynı kalan bir cisim durumuna kavuşur. Bu nedenle, gerekli koşullara uyularak üretilmiş betonun fiziksel özellikleri ürün hakkında bazı bilgiler verir.

7.3.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

SD ile üretilmiş betonların diğer fiziksel özellikleri konusunda karışımların özgül ağırlık, su emme ve boşluk oranları araştırılmıştır. Betonların diğer fiziksel

özeliklerinin belirlenmesinde kullanılan karışımlar TS 3068 esasına göre hazırlanan 10x10x10 cm boyutundaki küp numuneler kalıplara şişlenerek sıkıştırılır ve su tankına konulmak üzere $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'deki kür odasında %90 bağıl nemde koruma altına alınır. Burada bir tam gün bekletildikten sonra $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de değişmez sıcaklıktaki su tankına alınır. Herbir karışımın fiziksel özellikleri 28 günlük küp numuneler üzerinden belirlenmiştir.

TS 3624 esasına göre, beton numuneleri $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde 24 saat süre ile kurutularak etüv kuru su ağırlığı (B_{ek}) bulunur. Numunelerin, 24 saat su emme deneyine tabi tutulduktan sonra suya doymuş haldeki ağırlığı (B_{sda}) havada tartılarak bulunur. Su içinde 5 saat süre ile kaynatmada tamamlandıktan sonra $20-25^{\circ}\text{C}$ 'ye düşünceye kadar soğumaya bırakılır ve kaynama sonu ağırlığı (B_{ksa}) bulunur. Daha sonra kaynatılmış beton numunelerinin su içindeki ağırlığı (B_{sia}) bulunur. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki formüller yardımı ile betonların fiziksel özellikleri hesaplanır.

$$\text{Su Emme Oranı} = \frac{B_{sda} - B_{ek}}{B_{ek}} \times 100 \quad (\%)$$

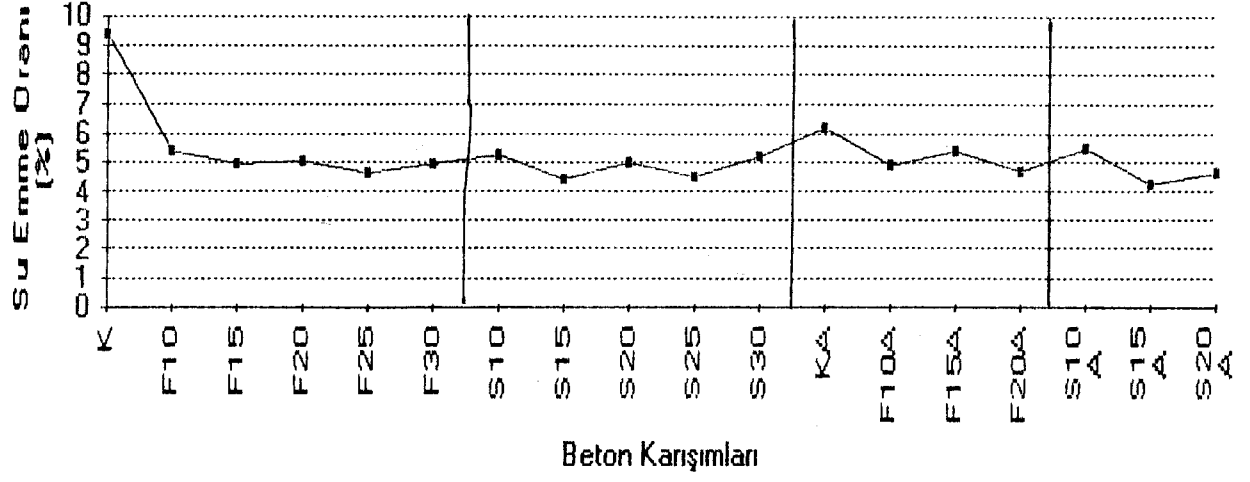
$$\text{Özgöl Ağırlığı} = \frac{B_{ka}}{B_{ka} - B_{ksa}} \quad (\text{kg/cm}^3)$$

$$\text{Boşluk Oranı} = \frac{(B_{ksa} - B_{ka})}{(B_{ksa} - B_{sia})} \times 100 \quad (\%)$$

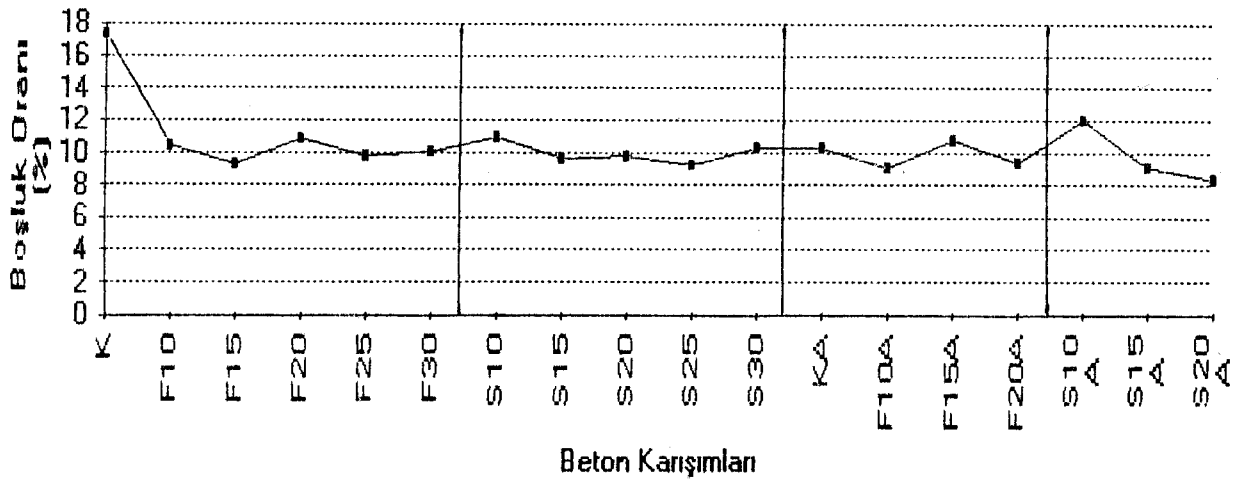
Burada, sertleşmiş betonda su emme oranı, etüv kuru su betonun suya doymuş kuru yüzeyli duruma getirilmesi ile ortaya çıkan ağırlık artışının etüv kuru su betonun ağırlığına oranıdır. Sertleşmiş betonun özgül ağırlığı, betonun havada tartılarak bulunan ağırlığının görünen hacmine oranıdır. Betonda boşluk oranı ise, beton içindeki geçirgen boşluk hacminin betonun görünür boşluk hacmine oranıdır. Elde edilen sonuçlar Tablo 7.3'de verilmiştir.

Tablo 7.3, Betonların Bazı Temel Özellikleri

Karışımlar	Özgöl Ağırlık (kg/dm ³)	Su Emme (%)	Boşluk Oranı (%)
K	2.21	9.35	17.32
F10	2.28	5.42	10.43
F15	2.25	4.93	9.33
F20	2.29	5.04	10.82
F25	2.29	4.63	9.82
F30	2.22	4.93	10.08
S10	2.20	5.28	10.92
S15	2.34	4.39	9.60
S20	2.25	4.99	9.76
S25	2.32	4.48	9.24
S30	2.30	5.20	10.26
KA	2.30	6.19	10.26
F10A	2.35	4.91	9.10
F15A	2.21	5.42	10.74
F20A	2.26	4.67	9.38
S10A	2.31	5.50	12.02
S15A	2.25	4.24	9.05
S20A	2.30	4.46	8.33



Şekil 7.1, Betonlarda Su Emme Oranı



Şekil 7.2, Betonlarda Boşluk Oranı

7.3.3. Tartışma

Araştırma kapsamına alınan karışım betonlarında en yüksek görünür boşluk (% 17.13) ve su emme oranı (%9.35) K betonunda oluşmuştur. SD'nin kullanılması ile betonların boşluk ve su emme oranlarında düşüş gözlenmektedir. Bu olay, SD'nin beton içerisindeki büyük boşlukları tıkaması ve daha yoğun yapılı betonların oluşmasına neden olması şeklinde açıklanabilir. Boşluk ve su emme oranı düşük betonların basınç dayanımlarına (7.2.3) bakıldığında, bu sonuçların SD oranı artması ile basınç dayanımlarında bir artış söz konusudur.

Postacioğlu'na (1987) göre, su emme oranı %8'in altında olan normal bir betonun az boşluk içerdiğini ve iyi bir niteliğe sahip olduğunu ileri sürmektedir. Bu yaklaşımdan hareketle, SD kullanılması durumunda betonlar daha iyi bir niteliğe sahiptirler.

Sonuç olarak, SD katkı betonlar; su emme etkisi altında bulunan havameydanı, liman ve deniz platformları, karayolu, döşeme ve plakları, temel ve perde duvarları, köprü ayağı ve yaklaşım dolguları kaplanması, demiryolu sanat yapıları, drenaj künkleri, denizlik vb. inşaatlarda kullanılabilir.

7.4. Basınç Dayanımı

7.4.1. Giriş

Betonun mekanik özellikleri arasında en çok inceleneni, bir anlamda en önemlisi basınç dayanımıdır. Basınç dayanımı betonun bir çok olumlu nitelikleriyle doğru orantılıdır. Yüksek basınç dayanımlı bir beton doludur, serttir, su geçirmez, dış etkilere dayanır ve aşınmaz. Betonun basınç

dayanımını saptamakla betonun niteliği hakkında genel bir değerlendirme yapılabilir (Akman, 1987).

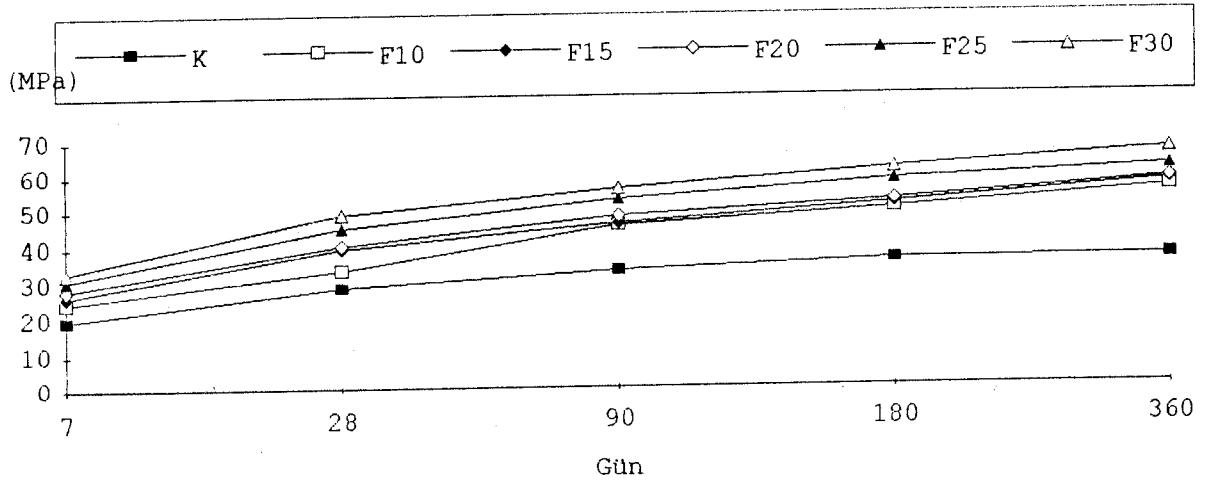
Betonun basınç dayanımına etkiyen bazı faktörler vardır. Bunlar arasında; bileşen malzeme ve özellikleri, kompasite, dış etkiler, kür ve deney şartları sayılabilir. Çimento dozajının yüksek olması mukavemeti bir yere kadar artırır, ancak dayanıma etkiyen faktör salt dozaj değil, S/B oranıdır. İyi bir betonda kompasite 0.80'den büyük olmalıdır. Kompasitesi yüksek, dolu bir betonun basınç dayanımı da doğal olarak yüksek olması beklenir. Sertleşme sürecinde rutubet ve sıcaklık derecelerinin betonun basınç dayanım gelişimine olan etkisi çok önemlidir.

7.4.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

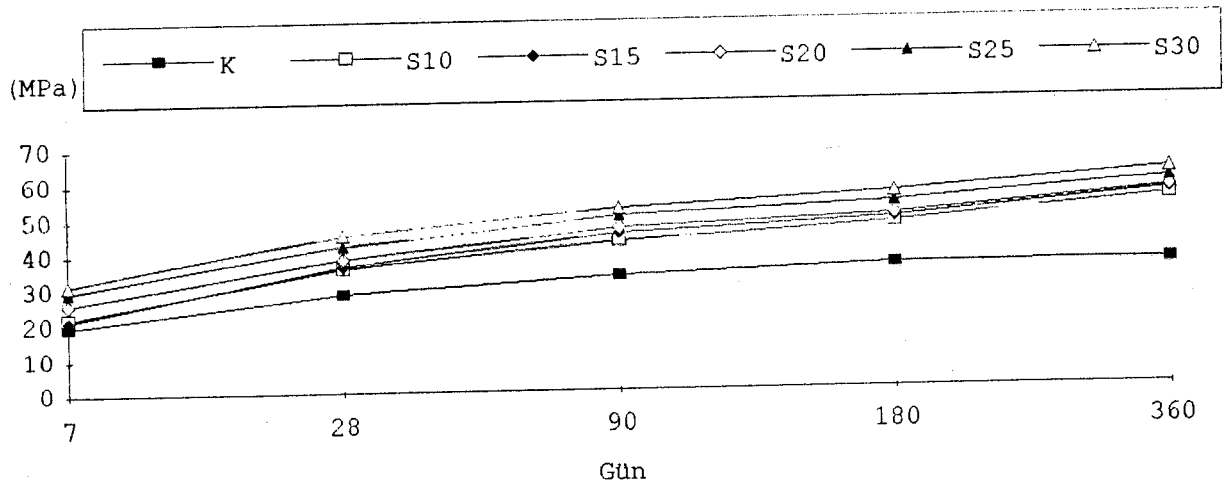
Basınç dayanımı deneyi için hazırlanan betonların karışım oranları Tablo 4.5'den alınmıştır. TS 3114 esasına göre hazırlanan taze beton 10 cm'lik küp kalıplara şişlenerek sıkıştırılır ve su tankına konulmak üzere $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'deki kür odasında %90 bağıl nemde koruma altına alınır. Burada bir tam gün bekletildikten sonra $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'de değişmez sıcaklıktaki su tankına alınır. Karışımlar deney gününe kadar bu ortamda bekletilir. TS 3114 esasına göre, beton karışımlarına kuvvet uygulaması, numune basınç presi aletinin tablaları arasına yerleştirildikten ve tablaların numunenin alt ve üst yüzlerine iyi bir şekilde oturması sağlandıktan sonra geçilir. Bu şartlar altında yürütülen deneyde, basınç presi makinesi, beton numunesinin taşıyabileceği maksimum kuvvete ulaştığı anda (Pk) yüklemeye otomatik olarak son vermektedir. Buna göre basınç dayanım değeri (BD); $BD = Pk/A$ formülü ile hesaplanmıştır.

Tablo 7.4, Betonların Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları (MPa)

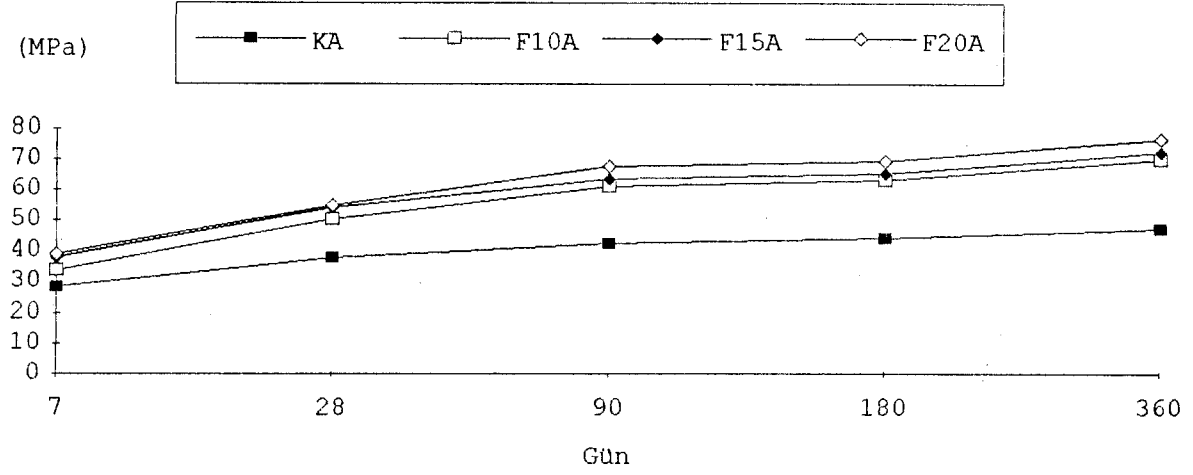
Karışım- şımlar	Basınç Dayanımı					% Kontrol	
	7. Gün	28. Gün	90. Gün	180. Gün	1. Yıl	28 Günlük	1 Yıllık
K	19.8	28.6	33.0	35.7	36.1	100	100
F10	24.5	33.3	45.5	50.2	55.6	116	154
F15	26.5	39.3	46.3	51.5	57.3	137	159
F20	28.3	40.1	48.2	52.6	58.0	140	161
F25	31.0	45.1	53.2	58.1	61.7	158	171
F30	33.1	49.0	56.2	61.5	66.5	171	184
S10	22.1	35.6	43.1	48.0	54.5	124	151
S15	21.6	36.4	45.5	49.2	56.2	127	156
S20	26.1	38.5	47.2	50.1	56.8	135	157
S25	29.8	42.2	50.4	53.6	59.3	148	164
S30	31.5	45.6	52.5	56.4	62.3	159	173
KA	28.5	38.1	42.5	44.3	47.2	100	100
F10A	34.1	50.6	61.0	63.1	70.1	133	149
F15A	38.1	54.1	63.5	65.2	72.3	142	153
F20A	39.1	54.9	67.5	69.4	76.8	144	163
S10A	30.8	48.6	60.4	62.3	68.9	128	146
S15A	31.6	48.9	62.0	65.5	70.3	128	149
S20A	39.0	50.6	65.2	68.8	72.1	133	153



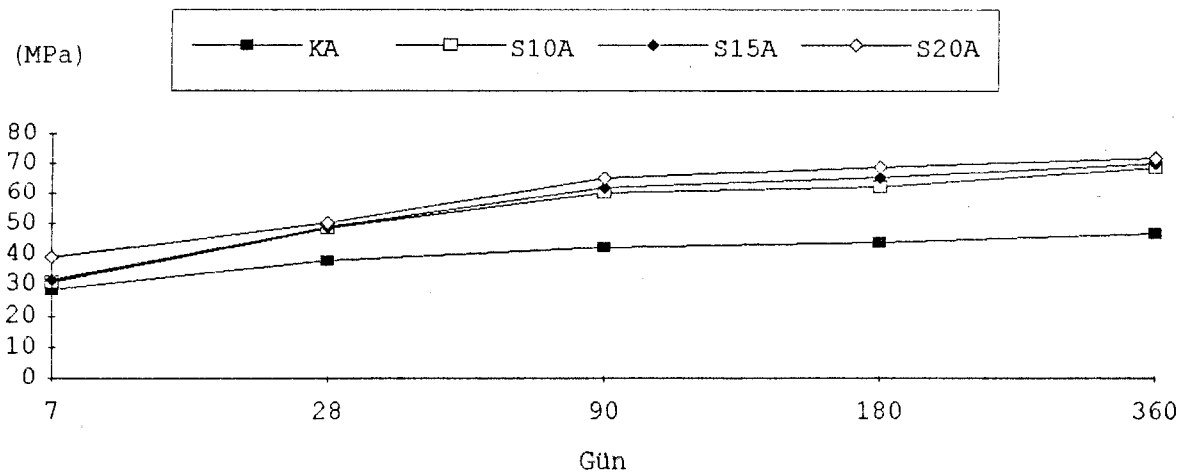
Şekil 7.3, FeSi Katkılı Betonların Basınç Dayanımı



Şekil 7.4, SiFeCr Katkılı Betonların Basınç Dayanımı



Şekil 7.5, SA Katkılı FeSi'li Betonların Basınç Dayanımı



Şekil 7.6, SA Katkılı SiFeCr'lu Betonların Basınç Dayanımı

7.4.3. Tartışma

Her iki beton karışım grubunda da SD katkısı ile basınç dayanımı artmaktadır. Tablo 7.4'deki değerlere ve Şekil 7.3, 7.4, 7.5 ve 7.6'ya göre %10 SD katkısı ile basınç dayanımı (1 yıl sonu itibarıyla) kontrol karışımının %50'si kadar yükselmekte, ancak daha fazla katılan SD ile dayanımdaki ilave yükselme %30 civarında kalmaktadır. Her iki SD ile elde edilen sonuçlar birbirine yakın olmakla birlikte FeSi'nin biraz daha etkili olduğu gözlenmektedir.

Kontrol numunesi 28. gün sonunda 28.6 MPa'lık basınç dayanıma ulaşırken, FeSi'li karışımlar kontrol numunesine oranla; %10 FeSi'da %16, %15 FeSi'da %37, %20 FeSi'da %40, %25 FeSi'da %58 ve %30 FeSi'da %71'lik dayanım artışı göstermiştir. Diğer taraftan, %10 SiFeCr'da %24, %15 SiFeCr'da %27, %20 SiFeCr'da %35, %25 SiFeCr'da %48 ve %30 SiFeCr'da %59'luk dayanım artışı göstermiştir.

Kontrol numunesi 1 yıl sonunda 36.1 MPa'lık basınç dayanıma ulaşırken, FeSi'li karışımlar kontrol numunesine oranla; %10 FeSi'da %54, %15 FeSi'da %59, %20 FeSi'da %61, %25 FeSi'da %71 ve %30 FeSi'da %84'lük dayanım artışı göstermiştir. Diğer taraftan, %10 SiFeCr'da %51, %15 SiFeCr'da %56, %20 SiFeCr'da %57, %25 SiFeCr'da %64 ve %30 SiFeCr'da %73'lük dayanım artışı göstermiştir.

Sonuç olarak, SD katkılı betonlar; yüksek basınç ve eğilmede çekme dayanımı gerektiren havameydanı, liman, karayolu, merdiven ve hazır merdiven basamakları, döşeme ve plakları, perde duvar, köprü yaklaşım dolguları kaplanması, demiryolu sanat yapıları, yüksek titreşimli endüstriyel yapılar, beton ve betonarma borular, ön ve artgermeli beton ve betonarme direkler vb. inşaatlarda kullanılabilir.

7.4.3. Tartışma

Her iki beton karışım grubunda da SD katkısı ile basınç dayanımı artmaktadır. Tablo 7.4'deki değerlere ve Şekil 7.3, 7.4, 7.5 ve 7.6'ya göre %10 SD katkısı ile basınç dayanımı (1 yıl sonu itibarıyla) kontrol karışımının %50'si kadar yükselmekte, ancak daha fazla katılan SD ile dayanımdaki ilave yükselme %30 civarında kalmaktadır. Her iki SD ile elde edilen sonuçlar birbirine yakın olmakla birlikte FeSi'nin biraz daha etkili olduğu gözlenmektedir.

Kontrol numunesi 28. gün sonunda 28.6 MPa'lık basınç dayanıma ulaşırken, FeSi'li karışımlar kontrol numunesine oranla; %10 FeSi'da %16, %15 FeSi'da %37, %20 FeSi'da %40, %25 FeSi'da %58 ve %30 FeSi'da %71'lik dayanım artışı göstermiştir. Diğer taraftan, %10 SiFeCr'da %24, %15 SiFeCr'da %27, %20 SiFeCr'da %35, %25 SiFeCr'da %48 ve %30 SiFeCr'da %59'luk dayanım artışı göstermiştir.

Kontrol numunesi 1 yıl sonunda 36.1 MPa'lık basınç dayanıma ulaşırken, FeSi'li karışımlar kontrol numunesine oranla; %10 FeSi'da %54, %15 FeSi'da %59, %20 FeSi'da %61, %25 FeSi'da %71 ve %30 FeSi'da %84'lük dayanım artışı göstermiştir. Diğer taraftan, %10 SiFeCr'da %51, %15 SiFeCr'da %56, %20 SiFeCr'da %57, %25 SiFeCr'da %64 ve %30 SiFeCr'da %73'lük dayanım artışı göstermiştir.

Sonuç olarak, SD katkılı betonlar; yüksek basınç ve eğilmede çekme dayanımı gerektiren havameydanı, liman, karayolu, merdiven ve hazır merdiven basamakları, döşeme ve plakları, perde duvar, köprü yaklaşım dolguları kaplanması, demiryolu sanat yapıları, yüksek titreşimli endüstriyel yapılar, beton ve betonarma borular, ön ve artgermeli beton ve betonarme direkler vb. inşaatlarda kullanılabilir.

7.5. Donma-Çözülme Dayanımı

7.5.1. Giriş

Postacıoğlu'na (1987) göre, boşluklu bir cismin boşluklarda bulunan suyun, sıcaklık derecesinin sıfırın altına düşmesi sonunda, donması cisimlerin dayanımının azalmasına ve hatta parçalanmasına yol açabilir. Böyle bir sonuç suyun donması sonunda hacminin artmasından ileri gelmektedir. Suyun donması sonunda hacminde %8,7 değerinde bir hacim artışı meydana gelir. Cisim içinde su birden bire değil yavaş yavaş donabilir. Suyun bir kısmının donması sonunda meydana gelen hacim artışı donmamış suları harekete geçirir, onları boşluklara iterek iç basıncı artırır. Suyun donmasının tamamlanmasında hacim artışı maksimum değeri almıştır. Bu durumda uzamanın, cismin boyuna karşı koyması sonunda gerçekleşmemesi ve ayrıca donmanın tamamlanmaması halinde doğan iç basınç cisim içinde çekme gerilmeleri oluşturur. Bu gerilmelerin, cismin çekme dayanımına ulaştığı bölgelerde çatlaklar meydana gelir. Suyun bu şekilde zararlı bir etki meydana getirebilmesi için, miktarının belirli bir değerden büyük olması gerekir. Eğer cisimde suyun işgal etmediği hacim, suyun donması sonunda meydana gelecek hacim artışından daha büyük ise donma olayı herhangi bir iç gerilme meydana getirmeyecek, aksi halde ise çekme gerilmelerinin oluşması ile zararlı etkiler kendini göstermeye başlayacaktır.

Sıcaklığın sıfırın altına düşmesiyle başlayan olay, kendini önce betondaki iri boşluklarda gösterir. Zira suyun donma derecesi boşluk boyutları küçüldükçe azalmaktadır. Bu nedenle iri boşluklarda başlayan donma olayı küçük boşluklara doğru gelişir ve bunun sonunda da kılcal boşluklardaki su donmaya başlar. Jel boşluk boyutları çok

küçük olduğundan buralarda buz kristalleri oluşamaz. Bu ince boşluklardaki suyun donabilmesi için sıcaklık derecesinin -78°C 'nin altına düşmesi gerekmektedir. Ortamda sıcaklık derecesinin sıfırın üstüne çıkmasıyla boşluklarda meydana gelmiş buz su haline dönüşür. Fakat, bu donma ve çözülme olaylarının tekrarlanması halinde çatlaklar gelişerek birbirleriyle birleşir, çatlaklar şebekesi meydana getirir. Olayın devam etmesi önce küçük parçaların betondan ayrılmasına veya dökülmesine neden olur. Bunu betonun tamamen parçalanması izler. Bu açıklamalardan betonun donmadan zarar görmesine yol açan malzeme dışında iki faktörün bulunduğu anlaşılmaktadır. Bunlar; ortamdaki sıfırın altındaki sıcaklık derecesi, diğeri ise donma ve çözülme olaylarının sayısıdır.

Sıcaklık derecesinin etkisi, buzun basınç mukavemetinin sıcaklık derecesi düştükçe artmasından kaynaklanmaktadır. Donma olayı sonunda buzda meydana gelen basınç gerilmesi buzun basınç dayanımına erişiyor veya bundan büyük bir değer alıyorsa buzun parçalanarak su haline dönüşmesi ile donma olayının zararlı etkisi ortadan kalkacaktır.

Donma olayı, zararlı etkisini çimento hamuru ve agrega fazında gösterir. Çimento hamurunda bulunan kılcal borulardaki suyun donması hamurun çatlamasına ve iç yapısının değişmesine neden olur. Bu zararlı etkilerin meydana gelmemesi veya sınırlı kalması için açıktır ki donan su hacminin az olması gerekmektedir. Bu ise, çimento hamurunun kılcal boşluklarının az olmasıyla yani çimento hamurunun kompazitesinin büyük olması ile gerçekleşebilir. Hamur kompazitesini etkileyen en önemli faktör ise S/B oranıdır. Bu oran ne kadar küçük ise kompazite o kadar büyük olacaktır. Bu durumda bir betonun donmaya dayanıklı olması isteniyorsa S/B oranı mümkün olduğu kadar (işlenebilme özeliğinin sağlanması şartı ile) küçük değerde olmalıdır.

Agrega taneleri ise, donma olayı sonunda parçalanarak, betonun bu olaydan etkilenmesine neden olur. Agregatanelerinin yüzeyleri çimento hamuru tarafından iyi sarılması sonucu geçirimsiz bir tabaka ile kaplanmasına neden olacaktır. Bu durumda tanelerin boşluklarında bulunan su hapsedilmiş olacaktır. Suyun içeride donması agregaların parçalanmasına neden olacaktır. Buradan donmaya dayanıklı beton elde edilmek isteniyorsa, porozitesi küçük olan agregaların kullanılması gerektiği sonucu çıkmaktadır.

Donma olayının ve bunun etkilerinin çok karmaşık olmasından dolayı laboratuvarında yapılan donma-çözülme deneylerinde donmadan zarar gören ve görmeyen betonları birbirinden ayıran kesin kriterler henüz ileri sürülememiştir. Bu konuda uygulanmakta olan belli başlı yöntemler şunlardır:

Betonun, dinamik elastiklik modülünde, basınç veya eğilme dayanımlarında, ağırlığında belirli bir azalmanın veya boyutlarında belirli bir artışın meydana gelmesi sonunda betonun donma etkisinden zarar gördüğü kabul edilir.

Betonların donma olayına karşı dayanımını ölçmek için hızlı ve yavaş olmak üzere değişik standart deneyler geliştirilmiştir. Bunlardan yavaş deneyler, (ASTM C 310), -20°C'de havada donma ve +20°C'de suda çözülme tabii tutulduğu için doğadaki gerçek şartlara çok benzemektedir. Hızlı deneyler ise, (ASTM C 666) doğadaki şartlardan daha sert olmaktadır. Bu deneylerde numunelerin durumları zaman zaman incelenmektedir. Döküntü ve çatlamların görülmesi, aşırı boy uzamaları, ağırlıklarının azalması, titreşim geçiş hızlarının veya mukavemetin azalması dondaki zararı belirtmektedir.

7.5.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Silis dumanının betonda kullanımı konusunda yapılan çalışmalar arasında donma-çözülme dayanımına olan etkilerinin fazla araştırılmamış olduğu görülmüştür. Bu nedenle deneysel bir çalışma yapılarak Türkiye'de elde edilmekte olan iki tip baca tozunu'nun katkı maddesi olarak betonun donma-çözülme dayanımına olan etkisi araştırılmıştır.

Postacıoğlu'na (1987) göre, 7.5.1'de ileri sürülen yöntemlerden en çok güvenli sonuçlar vereni, PGH ile tayin edilen elastiklik modülündeki donma sonunda meydana gelen azalmanın saptanmasıdır. Bu yöntemin en iyi olması numunenin kırılmadan yapılabilmesidir. Böylelikle, aynı beton numunesinde elastiklik modülünün ne oranda azaldığı belirlenirse donma etkisinin var olup olmadığı anlaşılır.

Betonların elastiklik modülü değişik yöntemlerle saptanabilir. Bunlardan biri kuvvet uygulayarak deformasyonlarının ölçülmesi ve daha sonra "Hooke Kanunu"nu uygulayarak elastisite modülünün (E) bulunmasıdır. E modülünün saptanmasında uygulanan diğer bir metod, beton içindeki puls geçiş hızı (PGH) değeri ile E modülü arasında şu bağıntının bulunmasıdır.

$$E = 10^5 \times PGH^2 \times B.A / g$$

Donma deneyine başlamadan önce (PGH_0) ise yukarıdaki bağıntıya başlangıçtaki E modül şu değere eşit olacaktır.

$$E_0 = 10^5 \times PGH_0^2 \times B.A / g$$

Donma-çözülme olayları yapıldıktan sonra betondaki boşlukların artması sonunda betonun içinde ses hızında bir

azalma olacak ve bu karakteristik PGH_0 'dan küçük PGH_1 gibi bir değer alacaktır. Bu durumda betonun E modülünün aldığı E_1 büyüklüğü şuna eşit olacaktır.

$$E_1 = 10^5 \times PGH_1^2 \times B.A / g$$

E_0 ve E_1 bilindikten sonra donma sonunda elastiklik modülünde meydana gelen azalma oranı ise;

$$AE / E_0 = (1 - E_1 / E_0)$$

ifadesi ile hesaplanır. E_1 ve E_0 yerine yukarıdaki ifadeler konulursa,

$$AE / E_0 = 1 - PGH_1^2 / PGH_0^2$$

olduğu hemen görülür. ASTM standardlarına göre 300 donma-çözülme olayı sonunda,

$$AE / E_0 = 0.40 (\% 40)$$

değerinin altına düşmesi durumunda, betonun donma etkilerine dayanıklı olması beklenir. Bu sonuç;

$$AE/E_0 = 1 - PGH_1^2 / PGH_0^2$$

denklemine götürülürse,

$$PGH_1 > 0.77 PGH_0$$

olduğu derhal anlaşılır.

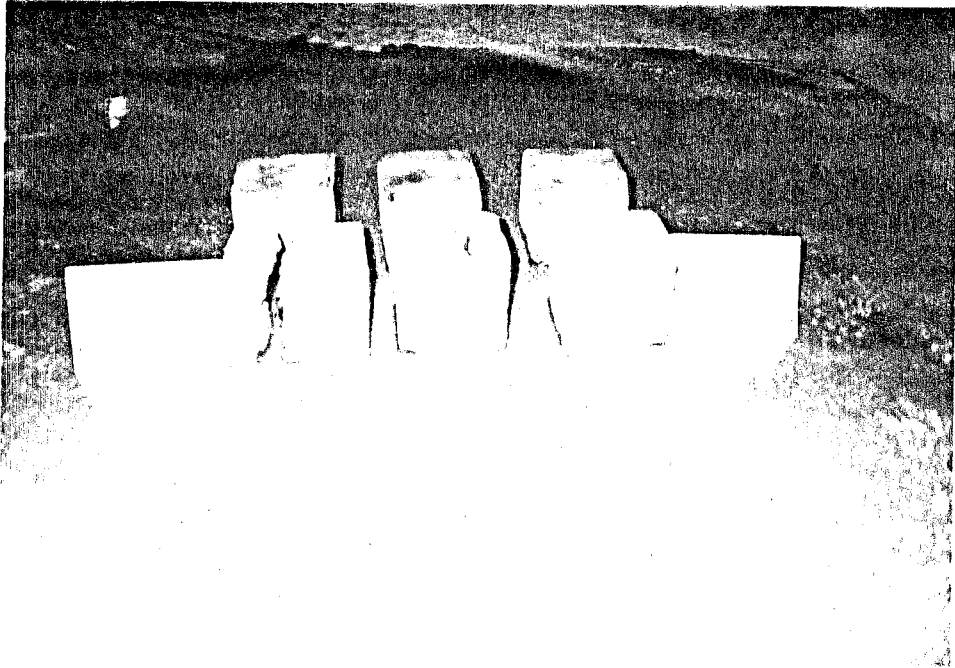
Donma-çözülme deneyi için hazırlanan betonların karışım oranları Tablo 4.5'den alınmıştır. TS 3068'e göre hazırlanan taze beton karışımları kalıplara vibratör ile sıkıştırılır ve su tankına konulmak üzere $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'deki kür odasında ve %90 bağıl nemde koruma altına alınır. Burada bir tam gün bekletildikten sonra $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'de değişmez sıcaklıktaki su tankına alınır. Karışımlar 28. gün süre ile bu ortamda bekletilir. Herbir karışımın donma-çözülme sonuçları 10 cm boyutundaki küp numuneler üzerinden alınmıştır.

Elde edilen sonuçlar Tablo 7.5'de verilmiştir. Betonların havada donma sıcaklığı $-18\pm2^{\circ}\text{C}$ (2 saat), çözülme sıcaklığı ise $5\pm2^{\circ}\text{C}$ (1 saat)'dir. Her 10 donma-çözülme tekrarı sonunda betonların puls geçiş hızları alınır.

Ses üstü titreşimlerin beton içindeki ilerleme hızı, genellikle (km/sn) boyutu ile verilen PGH büyüklüğü bize betonun iç yapısı hakkında bilgi vermektedir. Betonun bir yüzünden gönderilen ses dalgaları beton içinde ilerlerken yollar üstünde birtakım boşluklara rastgelir. Bir ses dalgası boşluk kenarına gelince karşı tarafa direkt geçemediğinden boşluğun etrafını dolaşacaktır. Bu olayın aynı doğrultuda iken pekçok defa tekrarlanması belirli iki nokta arasındaki yolunu artacaktır. Bu aynı zamanda sesin betonun bir yüzünden diğer yüzüne ulaşabilmesi için geçen zamanın artması demektir. Zamanın artması ile beton içindeki ultrases hızı azalmış olacağından betonda PGH küçük bir değer almış ise, bu betonda boşluğun fazla olduğunu ifade etmektedir. Buna karşılık PGH değerinin büyük olması betonun kompasitesinin büyük olduğu sonucuna vardır.



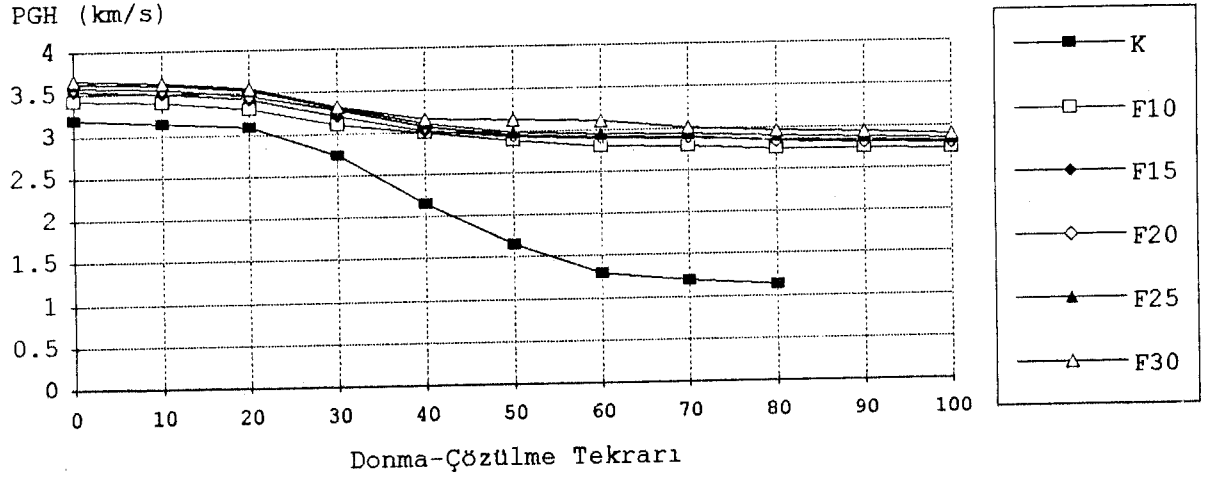
Fotograf 7.1, Donma-Çözülme Sonunda Betonların Genel Görünümü



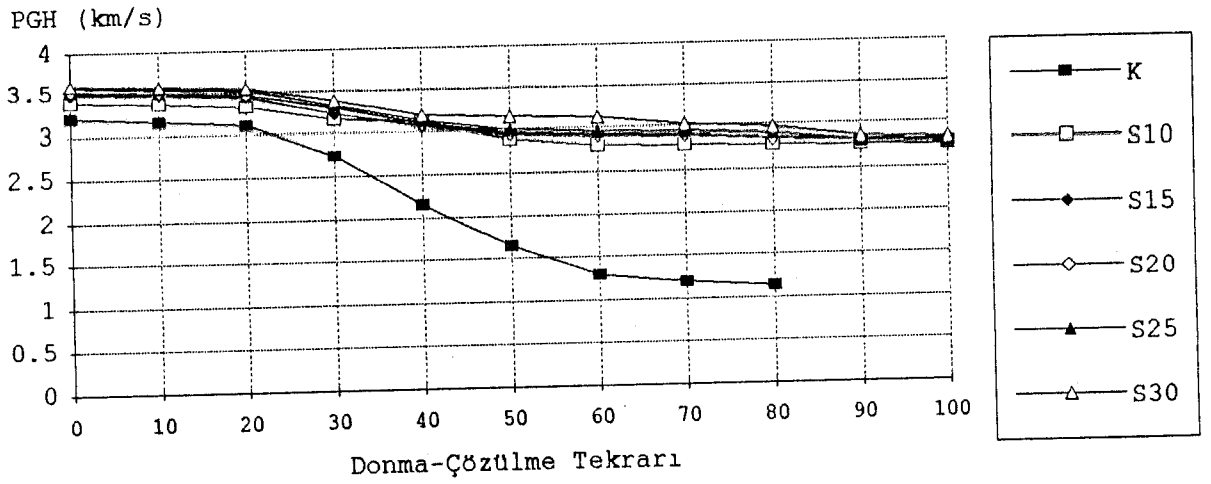
Fotograf 7.2, Donma-Çözülmeden Zarar Görmüş Beton Numuneleri

Tablo 7.5, Donma-Çözülme Deneyi Sonuçları

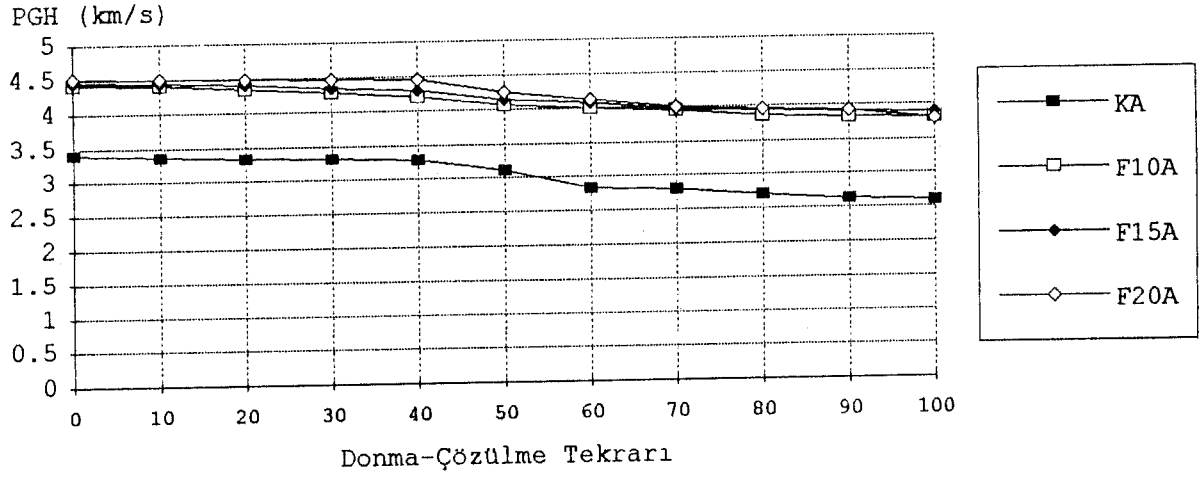
	PGH_o	PGH_n	E_o	E_n	AE/E_o	$PGH_n > 0.77 PGH_o$
K	3.20	1.14	2.40×10^5	0.3×10^5	0.87	2.46
F10	3.43	2.73	2.83×10^5	1.79×10^5	0.36	2.64
F15	3.54	2.82	3.02×10^5	1.92×10^5	0.36	2.72
F20	3.58	2.81	3.05×10^5	1.88×10^5	0.38	2.75
F25	3.62	2.66	3.12×10^5	1.68×10^5	0.46	2.78
F30	3.66	2.51	3.19×10^5	1.50×10^5	0.52	2.81
S10	3.39	2.76	2.76×10^5	1.83×10^5	0.33	2.61
S15	3.49	2.78	2.95×10^5	1.87×10^5	0.36	2.68
S20	3.52	2.81	2.97×10^5	1.65×10^5	0.47	2.71
S25	3.59	2.61	3.14×10^5	1.56×10^5	0.50	2.76
S30	3.60	2.53	3.17×10^5	1.56×10^5	0.38	2.77
KA	3.40	2.59	2.76×10^5	1.60×10^5	0.41	2.61
F10A	4.42	3.82	4.77×10^5	3.56×10^5	0.25	3.40
F15A	4.46	3.89	4.82×10^5	3.67×10^5	0.23	3.43
F20A	4.51	3.80	4.89×10^5	3.47×10^5	0.29	3.47
S10A	4.40	3.78	4.73×10^5	3.49×10^5	0.31	3.38
S15A	4.47	3.75	4.82×10^5	3.39×10^5	0.29	3.44
S20A	4.50	3.70	4.91×10^5	3.32×10^5	0.29	3.46



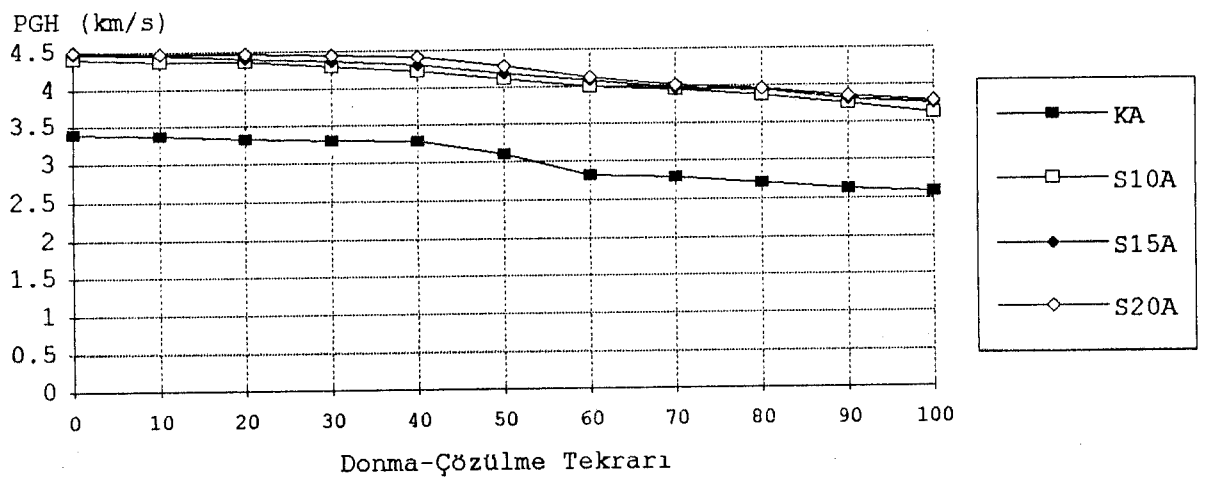
Şekil 7.7, FeSi Katkılı Betonların PGH Gelişimi



Şekil 7.8, SiFeCr Katkılı Betonların PGH Gelişimi

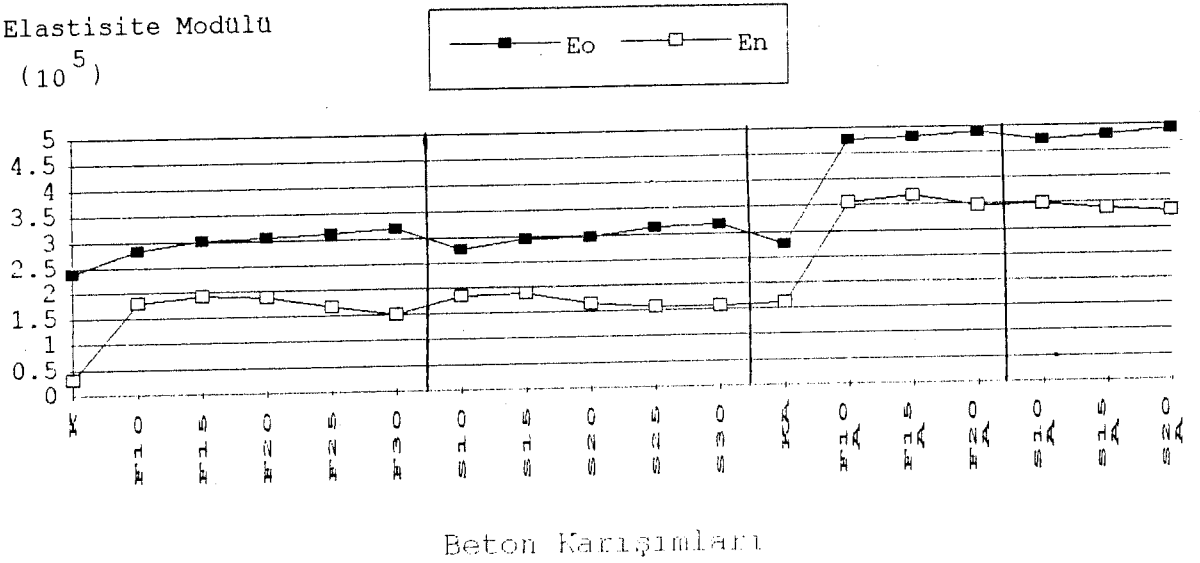


Şekil 7.9, SA Katkılı FeSi'li Betonların PGH Gelişimi



Şekil 7.10, SA Katkılı SiFeCr'lu Betonların PGH Gelişimi

Elastisite Modülü
(10^5)



Şekil 7.11, Betonların Elastisite Modülülünde Meydana Gelen Azalma

7.5.3. Tartışma

Plastik kıvamda hazırlanan karışımlardan kontrol betonları, 80. donma-çözülme tekrarı sonunda elastiklik modülü $E_o=2.3 \times 10^5$ 'den $E_n=0.30 \times 10^5$ 'ya düşerek parçalanmıştır. Bu parçalanma 40. donma-çözülme sonunda önce köşe yerlerindeki küçük boyuttaki agregaların kopması ile başlamış, deneye devam edildikçe yan yüzeylerinde gözle görülebilir şekilde şişmeler oluşmuştur. 50. donma-çözülme sonunda bu şişmeler üstünde yine gözle görülebilir çok ince ve 2-4 cm arasında değişen çatlaklar oluşmuştur. 60. donma çözülme sonunda da 6-7 cm'ye kadar ulaşmıştır.

Tablo 7.6, Donma-Çözülmede Görsel Dayanıklılık İndisleri

Karışımlar	Donma-Çözülme Tekrarı ve Davranış İndisleri			
	1-25	26-50	51-75	76-100
K	1 1 1 1	1 2 2 3	4 5 6 7	8
F10	1 1 1 1	1 1 1 3	1 2 3 4	4 5 5 5
F15	1 1 1 1	1 1 1 3	1 2 3 4	4 5 5 6
F20	1 1 1 1	1 1 1 3	1 1 2 3	3 4 4 4
F25	1 1 1 1	1 1 1 3	1 1 2 3	3 4 5 6
F30	1 1 1 1	1 1 1 3	1 1 2 3	4 5 6 7
S10	1 1 1 1	1 1 1 3	1 2 3 4	4 5 5 6
S15	1 1 1 1	1 1 1 3	1 2 3 4	4 5 5 5
S20	1 1 1 1	1 1 1 3	1 1 2 3	4 4 5 5
S25	1 1 1 1	1 1 1 3	1 1 2 3	4 4 5 6
S30	1 1 1 1	1 1 1 3	1 1 2 3	4 5 6 7
KA	1 1 1 1	1 1 2 3	2 3 4 4	4 5 6 7
F10A	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	2 3 3 3
F15A	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	2 3 3 3
F20A	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	2 3 3 3
S10A	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	2 3 3 3
S15A	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	2 3 3 3
S20A	1 1 1 1	1 1 1 1	1 1 1 1	2 3 3 3

Betonların Görsel Davranış İndisleri:

- 1 = Yüzeysel Bozulma Yok
- 2 = Köşe Yerlerinden Agrega Kopması
- 3 = 1-2 cm Kıl Şeklinde Çatlakların Oluşması
- 4 = 2-4 cm İnce Çatlakların Oluşması
- 5 = Yan Yüzeylerde Şişme Başlaması
- 6 = 4-6 cm İnce Çatlakların Büyümesi
- 7 = 6-8 cm İnce Çatlakların Derinlik Kazanarak Büyümesi
- 8 = Betonun Parçalanması

Tablo 7.6'da da görüleceği üzere, plastik kıvamda olmak şartıyla çimentonun yerine ağırlıkça %10, 15, 20, 25 ve 30 FeSi ve SiFeCr dumanları katılarak üretilen betonlarda 60. donma-çözülme sonunda özellikle köşelerinde küçük parçalar halinde ana kütlede kopmalar başlamıştır. 70. donma çözülme sonunda %10, 15, 20, 25 ve 30 FeSi ve SiFeCr bulunan

betonların bir kısmında ve yan yüzeylerinde 1-2 cm boyunda çok ince çizgi halinde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. 80. donma-çözülme sonunda ise özellikle %20, 25 ve 30 FeSi ve SiFeCr katkılı betonlarda bu ince çizgi halindeki çatlaklar daha da büyüyerek 2-4 cm boyutunu almıştır. SD katkılı %25 ve 30 olanlarda çatlak boyları daha büyüktür. 90. donma-çözülme sonunda %25 ve 30 SD katkılı betonların bazı yan yüzeylerinde şişmelerin yanısıra ince çizgi halindeki çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. 100. donma-çözülme sonunda ise bu çatlaklar 4-7 cm arasında kalmıştır.

SA kullanılarak hazırlanan karışımlardan KA betonları plastik kıvamda hazırlanan K betonlarına benzer şekilde köşelerinden küçük agregaların kopması, 60. donma-çözülme tekrarı sonunda başlamıştır. 70. donma-çözülme sonunda 2-4 cm boyutunda çok ince çizgiler ve çok az şişmeler belirmeye başlamıştır. Bu ince çizgiler ve şişme olayı 80. donma-çözülme sonunda çok daha iyi belirginleşmiştir. 90. donma-çözülme sonunda mevcut çatlak boyları artarak 6-8 cm boyutuna ulaşmıştır. Şişme olayı ise 100. donma-çözülmeye göre daha da büyümüştür.

SA kullanılarak S/B oranının 0.40 düzeyinde tutulan FeSi ve SiFeCr'lu betonlarda köşe noktalarında kopma ve çok ince çatlakların oluşması 80. donma-çözülme sonunda başlamıştır. Bu karışımlarda gözle görülebilir herhangi bir şişme oluşmamıştır.

KA betonlarının deneye devam edilmesi durumunda parçalanacağı düşüncesiyle deneye son verilerek 100. donma-çözülme sonunda betonların elastiklik modülündeki azalmalar incelenmiştir.

Tablo 7.5'deki değerlerden de anlaşılacağı üzere, %10, 15 ve 20 FeSi ve SiFeCr dumanları katılarak üretilen betonlarda elastiklik modüllerinde ortalama %60'luk azalma sonucunda betonlar kritik yapıya gelmektedirler. Betonlar

elastiklik modüllerini %60'dan daha fazla kaybetmesi durumunda donma olayından zarar görebileceklerdir. Yüzde 25 ve 30 SD katkı durumunda elastisite modülünde %50 civarında bir azalma olmuştur. Yani, %25 ve 30 SD katkısı içeren betonlarda donma-çözülme tekrarlarına dayanıklılık %10, 15 ve 20 SD katkılılara göre azalmaktadır. Bunun nedeni, çimento matrisi fazının çok yoğun olması ve suyun hareketine olanak kalmaması şeklinde açıklanabilir. SA katkılı kontrol betonu 100. donma çözülme sonunda elastiklik modülünü yaklaşık %70 kaybederek kritik noktaya ulaşırken, diğer betolardan FeSi katkılı olanlar ortalama %35, SiFeCr'lu betonlar ise ortalama %40 elastiklik modüllerini kaybetmektedirler.

Bu olay, beton üretiminde kullanılan FeSi ve SiFeCr dumanlarının iri boşlukları azaltması, bunun yanı sıra küçük çaplı boşluk sayısını artırması sonucu donma-çözülme tekrarlarına karşı betonların daha mukavemetli olmalarına neden olmuştur şeklinde açıklanabilir.

Plastik kıvama göre hazırlanmış betonların 100 donma-çözülme sonunda kritik yapıya ulaşmalarının nedeni S/B oranının yüksek olması şeklinde açıklanabilir. S/B oranı yüksek olan betonlarda boşluk miktarıda ister istemez fazla olacaktır. Plastik kıvamdaki betonların boşluk yapılarında donma olayının etkisiyle birtakım fiziksel değişikliklerin meydana geldiği düşünülmektedir. Betonların hacim artmasının (şişme) kılcal boru boyutlarının artmasına neden olduğu bilinmektedir. Kılcal boyutlarının büyümesi kılcal basıncın değerini düşürecektir. Bunun sonucunda cismin kılcallık katsayısı küçülerek kılcallık yolu ile betonun içine daha fazla su girecektir. İç gerilmelerin çatlaklar meydana getirmesi sonucunda kapalı boşluklar miktarında bir azalma, açık boşluk miktarında bir artış olacaktır. Bu değişiklik betonun geçirimliliğinin artmasıyla

kendisini gösterir. Beton geçirimsizliğinin azalması, boşluk miktarının fazla olmamasına bağlıdır. Bu nedendir ki 100. donma-çözülme sonunda ultrasonik ses geçiş hızı azalmıştır.

Betonların donma-çözülme sonunda elastiklik modüllerindeki yüksek orandaki değişiklik, betonların donma olayından zarar görebileceği anlamına gelir. 100. donma-çözülme sonunda elastiklik modülündeki değişiklik donmuş betonlardaki çatlakların dolayısıyla porozitesinin artmasından oluştuğu düşünülmektedir.

Tablo 7.5'deki değerlere, Tablo 7.6'daki davranış indislerine ve Şekil 7.7, 7.8, 7.9, 7.10 ve 7.11'e göre, betonların basınç dayanımları ve katkı yüzdeleri attıkça donma-çözülme tekrarlarına karşı dayanıklılık da artmaktadır. FeSi dumanları SiFeCr dumanlarına kıyasla donma-çözülme tekrarlarına etkisi daha iyi görünmektedir. Ayrıca, SA katkı kullanılarak S/B oranının 0.40 düzeyinde tutulan betonlar donma-çözülme tekrarlarına karşı daha dayanıklı çıkmışlardır.

Sonuç olarak, SD katkılı betonlar; donma-çözülme tekrarlarına karşı dayanıklı olması istenen havameydanı, liman, karayolu, döşeme ve plakları, perde duvar, köprü ve köprü yaklaşım dolguları kaplaması, demiryolu sanat yapıları, drenaj künkleri, beton ve betonarme borular, ön ve artgermeli beton ve betonarme direkler vb inşaatlarda kullanılabilir.

7.6. Sürtünme Yolu İle Aşınma Kaybı

7.6.1. Giriş

Betonlar kullanım yerlerine bağlı olarak önemli ölçüde aşınmaya maruz kalabilirler. Bu aşınma; sürtünme, darbe, korozyon ve yorulma gibi etkilerin beton yüzeyinde ayrı ayrı veya birlikte oluşmaları sonucu zamanla meydana gelir (Postacioğlu, 1966). Köprü tabliyeleri, karayolları, hava meydanı pistleri gibi trafik yükü altındaki beton elemanlar ile akarsulara maruz hidrolik beton yapıların faydalı ömürleri, yüzeylerinin aşınma dayanımları ile yakından ilişkilidir. Bileşik bir malzeme olan betonda harç sürekli fazı, iri agrega ise, dağılı fazı oluşturur. Genelde aşınma dayanımı yüksek bir beton elde edebilmek için, iri agreganın yoğun ve yeter dayanımda olması kaydı ile sürekli fazın mümkün olduğu kadar küçültülmesi önerilir (Postacioğlu, 1987). Harç fazının aşınması ise, elde edilen çimento hamuru ile ince agrega özelliklerine bağlıdır. Örneğin, yüksek dayanımlı çimento, düşük su/bağlayıcı orantısı ve sert taneli kum kullanılması harç fazının küçültülmesini mümkün kılacaktır. Sürtünme yolu ile aşınma; beton yüzeyinin pürüzlülüğü ile de ilgilidir. Ancak, pratikteki yöntemlerle tamamen pürüzsüz bir beton yüzeyi elde edilmesi oldukça zor olmaktadır.

Bu gibi düşüncelerle, betonda aşınma dayanımını artırmak için metal agregaları ve çelik tozu gibi maddelerin kullanılması önerilmektedir. Özel fırınlarda silis ve karbonun birleştirilmesinden meydana gelen Karberundum'un harç ve betona karıştırılması da pratik bakımdan olumlu sonuçlar vermektedir. Betonda aşınma farklı etkiler sonucu meydana geldiği için genelde aşınma dayanımını belirleyen tek bir

deney yoktur. Ancak, beton basınç dayanımı ile aşınma dayanımı arasında genel bir ilişki kurulabilmektedir.

7.6.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Silis dumanının betonda kullanımı konusunda yapılan çalışmalar arasında sürtünme dayanımına olan etkilerinin fazla araştırılmamış olduğu görülmüştür. Bu nedenle deneysel bir çalışma yapılarak Türkiye'de elde edilmekte olan iki tip baca tozunu'nun katkı maddesi olarak betonun sürtünme yolu ile aşınma dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Katkısız ve çimentonun belirli yüzdeleri olarak SD katılarak elde edilen katkılı betonlar üzerinde Böhme metodu ile ve TS 699 ile TS 2824 metodlarına uygun olarak aşınma kayıpları belirlenmiştir. Sonuçlar beton basınç dayanımları ve katkı yüzdeleri ile ilişkili olarak yorumlanmıştır.

Böhme metodu ile sertleşmiş betonlarda sürtünme yolu ile aşınma kaybı deneyi TS 699'a uygun olarak yapılmış olup, elde edilen sonuçlar TS 2824 esasına göre Tablo 7.7'de verilmiştir. Beton karışımlarından elde edilen 100 mm boyutlarındaki kübik numuneler %90 bağıl nemde bir gün bekletildikten sonra 23°C sıcaklıktaki suda deney gününe kadar muhafaza edilmişlerdir. Numuneler 28 günlük iken kesilerek 70 mm'lik küpler haline getirilip deneye hazırlanmışlardır.

Fotograf 7.3'de gösterilen Böhme aleti yaklaşık 750 mm. çapında bir disk, dakikada 30 devir dönmesini sağlayan bir motor, devir sayısını gösteren numaratör ve her 22 devir tamamlandığında motoru otomatik olarak durduran bir mekanizmaya sahiptir (Albayrak, 1985). Böhme yüzey aşındırma deneyi; numunelerin kalınlıklarında veya hacimlerinde meydana gelen azalmanın ölçülmesi suretiyle yapılır. Bu çalışmada,

sürtünme yolu ile aşınma kaybının bulunmasında, hacim azalmasının ölçülmesi tercih edilmiş ve sonuçlar buna göre yorumlanmıştır. Bu amaçla hazırlanan 28 günlük numuneler yarı yüksekliklerine kadar 23°C'deki su içine batırılarak 1 saat bekletildikten sonra su seviyesi numunelerin üst yüzeyinden 20 cm yukarıya çıkarılmış ve 24 saat süre ile bu konumda bırakılmışlardır. Bu süre sonunda beton numune Arşimed terazisinde tartılarak (A_{sa}) değeri bulunmuştur. Hemen sonra, numune yüzeyi havlu ile kurulayıp havada tartılarak (A_{dky}) ağırlığı belirlenmiştir. Bütün tartımlar 0.1 g duyarlılıkta yapılmıştır. Numune hacimleri

$$H_o = A_{dky} - A_{sa}$$

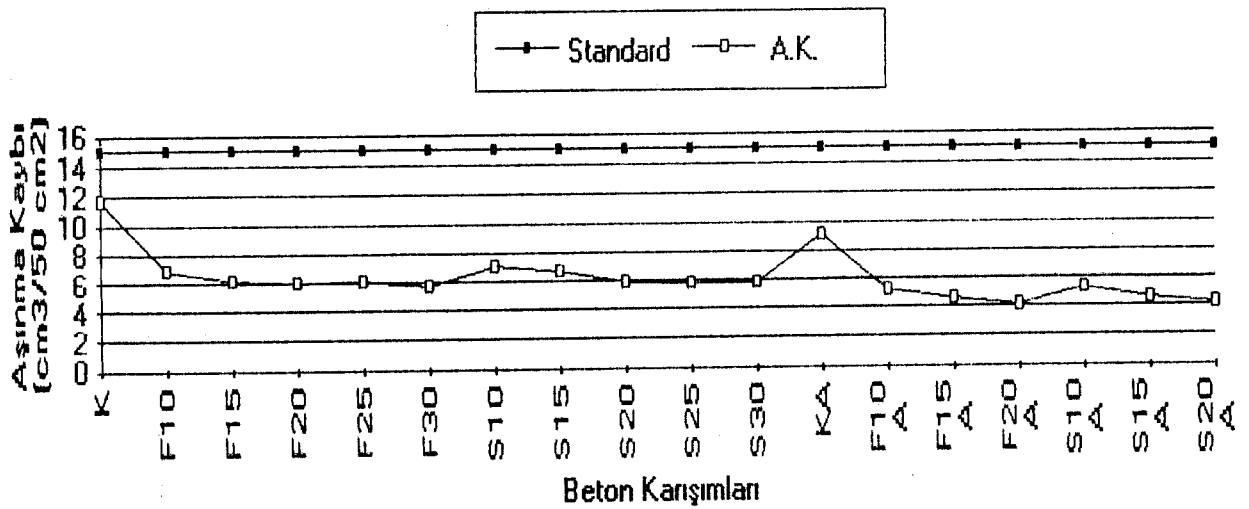
olarak hesaplandıktan sonra, numuneler oda sıcaklığında %50 bağıl nemli ortamda 48 saat süre ile bekletilerek havada kurutulmuşlardır. Böhme cihazının sürtünme şeridine 20 g standard zımpara tozu serpidikten sonra numune yerleştirilmiş ve çelik manivela aracılığı ile yükleme koluna 6 kg yüklenerek disk harekete geçirilmiştir. Toplam 352 devir sonunda numune orta sertlikte bir kıl fırça ile temizlenmiş ve gene 0.1 g duyarlılıkta tartılarak son hacmi (H_s) bulunmuştur. Sürtünme yolu ile aşınma kaybı (AK), yüzey alanı (A) olan bir numune için:

$$AK = (H_o - H_s / A) \times 50 \text{ (cm}^3\text{/50 cm}^2\text{)}$$

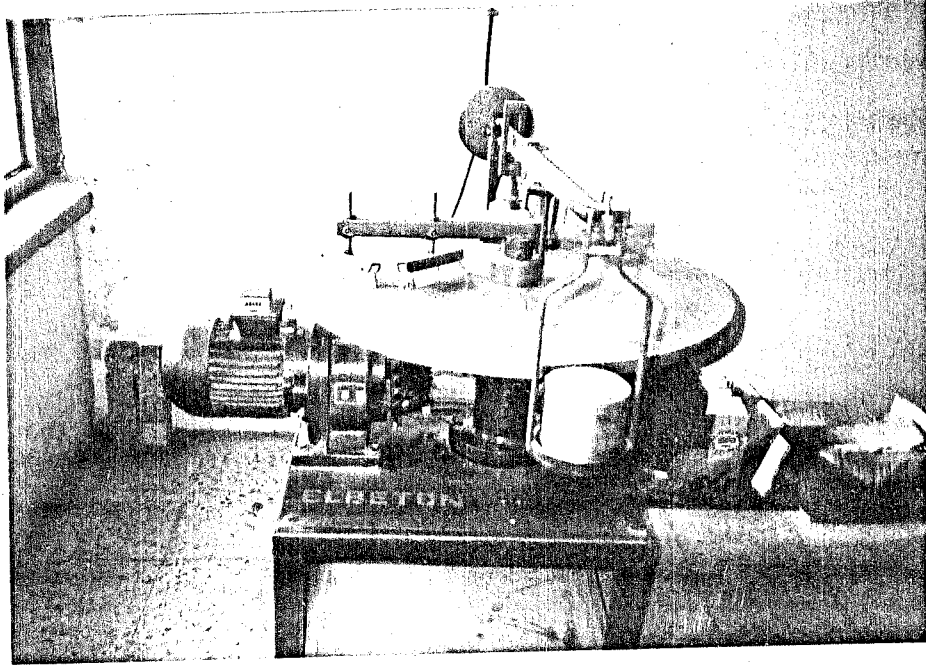
olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçları her beton karışımından 6 numune ortalaması olarak Tablo 7.7'de verilmiştir.

Tablo 7.7, Betonlarda Sürtünme Yolu İle Aşınma Kaybı

Karışımlar	Fiziksel Özellikler			AK (cm ³ /50cm ²)	% Kontrol
	A cm ²	H ₀ cm ³	H _s cm ³		
K	49.2	352.0	341.1	11.7	100
F10	49.2	361.4	354.6	6.89	59
F15	49.3	357.8	351.5	6.18	53
F20	49.8	348.7	342.7	6.02	51
F25	49.5	349.5	343.6	6.06	52
F30	49.4	340.2	334.5	5.76	49
S10	49.3	349.0	352.0	7.09	61
S15	49.2	358.8	352.2	6.70	57
S20	49.8	352.7	346.8	5.92	51
S25	49.6	355.6	349.8	5.84	50
S30	49.1	339.4	333.7	5.80	50
KA	49.6	351.5	342.4	9.17	100
F10A	49.3	343.7	338.6	5.17	56
F15A	49.6	341.9	337.4	4.53	49
F20A	49.4	350.9	346.8	4.14	45
S10A	49.3	351.2	346.0	5.27	57
S15A	49.8	353.2	348.6	4.61	50
S20A	49.2	352.0	347.9	4.16	45



Şekil 7.12, SD Katkısının Betonlarda Sürtünme Yolu İle Aşınma Kaybına Etkisi



Fotograf 7.3, Böhme Yüzey Aşındırma Aleti ve Uygulaması

7.6.3. Tartışma

TS 2824'e göre sürtünme yolu ile aşınma kaybı değeri 50 cm²'de ortalama 13 cm³'den fazla ise beton aşınmaya karşı mukavemetsiz kabul edilir (TS 2824, 1989). Bu değerlendirmeye göre Tablo 7.7'deki (AK) sonuçlar deneylerde kullanılan bütün beton karışımlarının aşınmaya dayanıklı olduğunu göstermektedir. Her iki beton karışım grubunda da SD katkısı ile aşınma kaybı azalmaktadır. Tablo 7.7'deki değerlere ve Şekil 7.12'ye göre %10 SD katkısı ile aşınma kaybı kontrol karışımının %60'ı mertebesine inmekte, ancak daha fazla katılan SD ile aşınmadaki ilave azalma sadece %10 civarında kalmaktadır. Her iki SD ile elde edilen sonuçlar birbirine yakın olmakla birlikte FeSi baca tozunun biraz daha etkili olduğu gözlenmektedir. SD'nin aşınmayı azaltmadaki etkisi düşük su-bağlayıcı malzeme oranlı beton karışımlarında biraz daha fazladır.

Sonuç olarak FeSi ve SiFeCr baca tozları katkı maddesi olarak betonda sürtünme yolu ile aşınma dayanımını arttırmaktadırlar. Bunda SD'nin etkin bir pozolan oluşu ve özellikle betondaki sürekli faz ve çimento hamurunda kompasite ve dayanımı artırıcı etkisi rol oynamaktadır. Ayrıca SD iri agrega-hamur ara yüzeyini de kuvvetlendirmektedir. Ancak, bu çalışmanın sonuçları SD katkılı betonlarda basınç dayanımı ve sürtünme yolu ile aşınma arasındaki ilişkinin katkısız betonlardan biraz farklı olabileceği izlenimini uyandırmıştır. %10 kadar katılan SD ile aşınma kaybında büyük azalma görülmekte ancak daha fazla SD katıldığında basınç dayanımı önemli ölçüde artmaya devam ederken aşınma dayanımındaki artış yavaşlamaktadır. Hava meydanı, liman, karayolu, akarsu yapıları, merdiven, döşeme ve plakları, köprü yaklaşım dolguları, demiryolu sanat yapıları gibi aşınma yolu ile sürtünmeye maruz beton elemanların yüzey tabakalarında SD katkısının çok yararlı olacağı anlaşılmaktadır.

7.7. Çarpma Dayanımı

7.7.1. Giriş

Beton yollar ve hava meydanları çarpma etkisi altında bulunurlar. Ayrıca betonarme kazık ve palplanşların başları, bu tür zorlama ile karşı karşıya gelmektedir. Bu gibi yerlerde kullanılan betonların çarpmaya dayanıklı olması gerekmektedir. Bir betonun çarpmaya dayanıklı oluşu basınç ve çekme dayanımının yüksek olması ile ilişkilidir. Bir başka deyişle; basınç dayanımı aynı düzeyde olan betonlar arasında çarpmaya en büyük dayanıklılık gösterenler, çekme dayanımı en yüksek

olanlardır. Bundan dolayı beton üretiminde iri agrega olarak çakıl yerine kırma taş kullanılması halinde çarpmaya daha dayanıklı betonlar elde edilir. Kırma taşlı betonların ayrıca daha fazla deformasyon yapma kabiliyetine sahip olması da, betonun daha fazla enerji alabilmesi nedeniyle, tokluğunu ve çarpmaya karşı dayanıklılığı artırır. Zamanla betonun deformasyon yapma kabiliyetinde azalma belirli bir süreden sonra, betonun yaşı ilerledikçe çarpma dayanıklılığının azalmasına yol açar (Postacıoğlu, 1987).

Betonların ani yüklenmesi veya çarpmaya maruz kalması, statik yüklemelerden çok farklı bazı durumların meydana gelmesine neden olmaktadır. Betonlarda çarpma olayı, bir cismin belirli bir yükseklikten düşmesi veya bir kuvvetin ani uygulanması şeklinde olmaktadır. Özellikle yollar, limanlar ve havameydaları sıkça bu tür zorlamalar altında bulunmaktadır. Ayrıca demiryolu sanat yapıları da benzer zorlamalar etkisinde kalmaktadır. Çok hızlı bir şekilde hareket eden lokomotif de köprü elemanlarına aynı etkiyi yapabilir. Eğer beton bu tür yüklemeler karşısında dayanıklı değilse mukavemetini kaybederek kendisinden beklenen fonksiyonu yapamayacaktır.

Çarpma etkisiyle cisimlerde büyük gerilmeler meydana gelmektedir. Diğer taraftan bu gerilmeler çok kısa sürede büyük değerlere ulaşmaktadır. Kuvvetlerin hızlı bir şekilde tatbik edilmesi cisimlerin çarpmaya karşı malzemenin kohezyon dayanımının önemli bir rol oynamasına yol açmaktadır. Çarpma sonucunda gerilme ve deformasyonların elastik bölge dışına çıkması durumunda; gerilme ve deformasyonlar çok karmaşık bir durum alır. Bu durumda bazı denklemler yardımıyla gerilme ve deformasyonların bulunması bazen mümkün olamamaktadır.

Malzemenin çarpma etkilerine dayanıklılığı üç temel faktöre bağlı bulunmaktadır. Bunlar; kuvvetin tatbik hızının malzeme mukavemeti üzerine etkisi, cisimde meydana gelen gerilme yığılmasının şiddeti ve malzemenin sıcaklık

derecesidir. Genel olarak sıcaklığın düşmesi cisimlerin çarpmaya karşı dayanıklılığının azalmasına neden olmaktadır (Postacioğlu, 1966). Diğer bir yaklaşımla, tokluk derecesi ve süneklik arttıkça cisimler darbeye daha dayanıklı olmaktadırlar. Kat döşemelerinin ince tutulması isteği ve ayrıca yüksek katlı binalarda alt kolon boyutlarının büyümesi sonucunda hacim kaybı doğması gibi nedenlerden dolayı çerçevelerle birlikte perde duvarı gibi yatay yük taşıyıcı elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Düzlem içi rijitlikleri yüksek olan bu perde duvarları, yapı planında uygun yerleştirildikleri taktirde, yatay yüklere karşı dayanımı ekonomik olarak sağlamaktadır (Dündar ve Kırıl, 1986). Çok katlı yapılarda rüzgar ve depremde meydana gelen kuvvetler genellikle perdeler (taşıyıcı duvarlar) tarafından alınmaktadır (Sungur, 1986). Asansör çevresi ve merdiven boşluklarına yerleştirilen şaft veya kesme duvarları özellikle deprem sırasında meydana gelen yatay kuvvetlere karşı yeterli dayanımın sağlanması için gerekli olmaktadır.

7.7.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Çarpma dayanım deneyi için Tablo 4.5'deki karışım oranlarında hazırlanan taze beton karışımları 10 cm'lik küp kalıplara şişlenerek sıkıştırıldıktan sonra, su tankına konulmak üzere %90 bağıl nem ve $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'deki ortamda koruma altına alınır. Bu konumda bir tam gün bekletildikten sonra $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de değişmez sıcaklıktaki su tankında deney yaşına kadar bekletilir. Beton numunelerine çarpma uygulamasına 28 günlük yaşı doldurduktan ve 48 saat doğal kuruması sağlandıktan sonra geçilmiştir.

Sertleşmiş betonlarda çarpma dayanımı deneyi aşağıda açıklanan özel yöntemle yapılmış olup, sonuçları Tablo 7.9 ve 7.10'da verilmiştir. Çimentonun yerine değişik oranlarda FeSi ve SiFeCr dumanları katılarak üretilmiş betonların çarpma olayı karşısındaki davranışları incelenmiştir. SA kullanılmayan karışımlarda S/B oranı, yaklaşık 80 mm'lik çökmeyi sağlayan miktardır. SA kullanılan karışımlarda S/B oranı 0.40 düzeyinde sabit tutulmuştur.

Çarpma dayanım deneyi (Fotograf 4), belirli bir ağırlığın belirli bir yükseklikten düşürülmesi esasına dayanır. Fotograf 7.4'de görülen deney aleti 13.8 kg'lık sabit bir ağırlığa sahip olup, ağırlığın serbest olarak düşürülme mesafesi 25 cm ve 35 cm olarak tarafımızdan seçilmiştir.

Beton karışımlarında çarpma öncesi ve çarpma sonrası oluşabilecek yeni iç yapı gelişmesi ve mukavemet azalması hakkında bilgi edinmek amacıyla ultrasonik test cihazı kullanılır (Fotograf 7.5). Bu cihaz yardımı ile beton numunelerine ultrasonik ses gönderilerek puls geçiş süreleri tespit edilir.

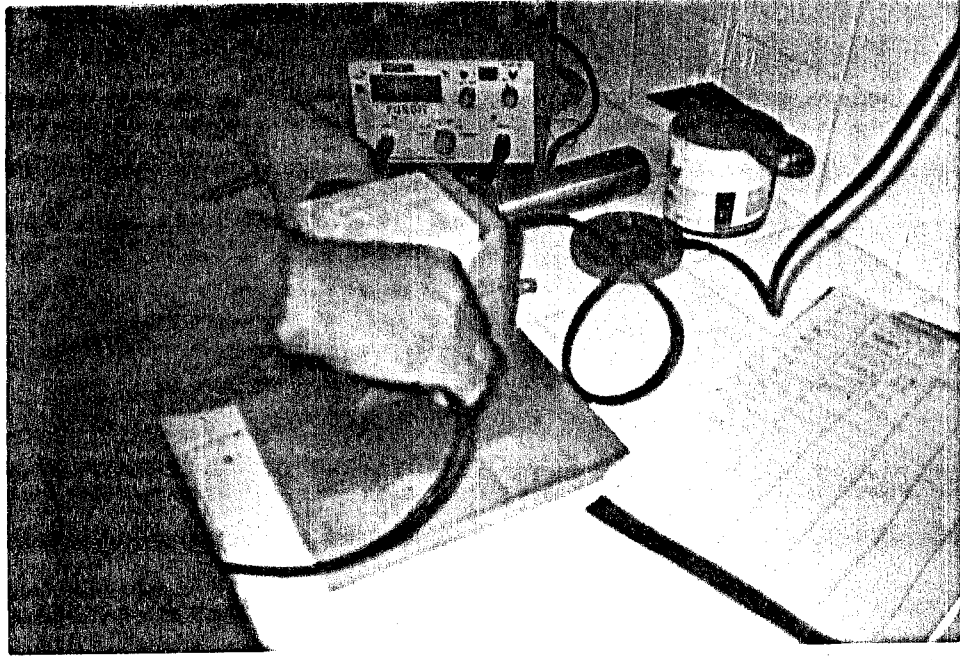
Bu özel yönteme esas olmak üzere Tablo 4.5'deki verilen karışım oranlarıyla ön deneme karışımları hazırlanır. Bu karışım numunelerin önce ağırlığı (g), sonra ultrasonik test ile PGH (km/s) olarak ve daha sonra da basınç presisi ile basınç dayanım değerleri MPa olarak bulunur. Elde edilen Tablo 7.8'deki sonuçlar ile Şekil 7.13'de verilen eğri oluşturulur. Daha sonra, bu eğri ardışık çarpma uygulaması sırasında elde edilen PGH eşdeğer küp basınç dayanımlarına dönüştürülmesinde esas alınır.

Şekil 7.13'deki eğri oluşturulduktan sonra, araştırma kapsamındaki karışımlar üzerinde çarpma uygulamasına geçilir. Deneye tabi tutulan her bir karışımın çarpma öncesi ağırlığı ve PGH bulunur. Daha sonra, 1 çarpma uygulanır ve bu çarpma sonrası sırasıyla ağırlığı, ağırlık kaybı ve PGH bulunur. Bu

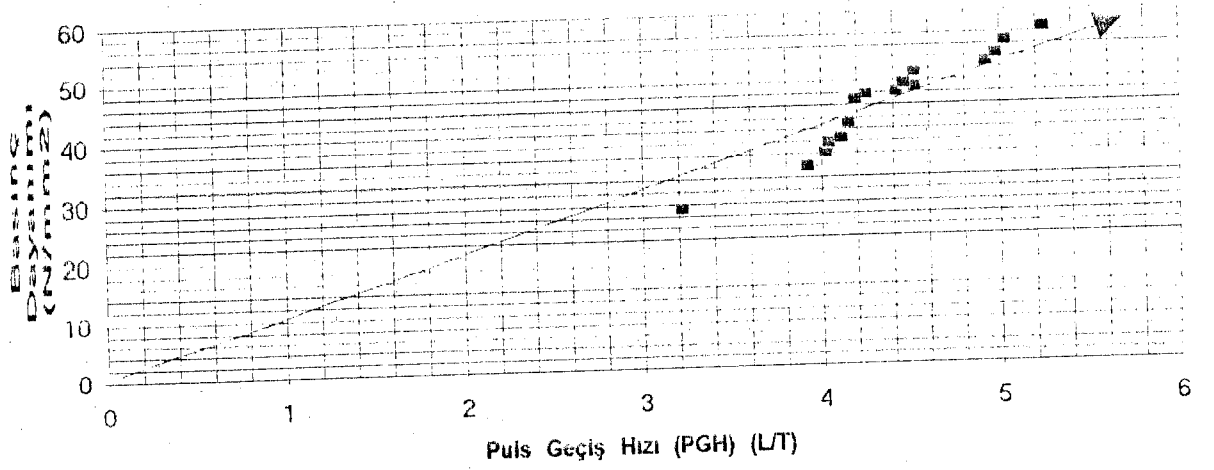
şekilde beton numunelerinin yan yüzeylerinde puls hızı okumasına uygun alan kalıncaya kadar ardışık çarpma uygulamasına devam edilerek en son ağırlığı, ağırlık kaybı ve PGH belirlenir. Herbir ardışık darbe uygulaması bitiminde çarpmadan dolayı oluşan yeni ağırlık, ağırlık kaybı ve PGH ön deneme karışımlarıyla oluşturulan eğri esas alınarak yorumlanır.



Fotograf 7.4, Çarpma Uygulaması



Fotograf 7.5, Ultrasonik Puls Geçiş Hızının Bulunması



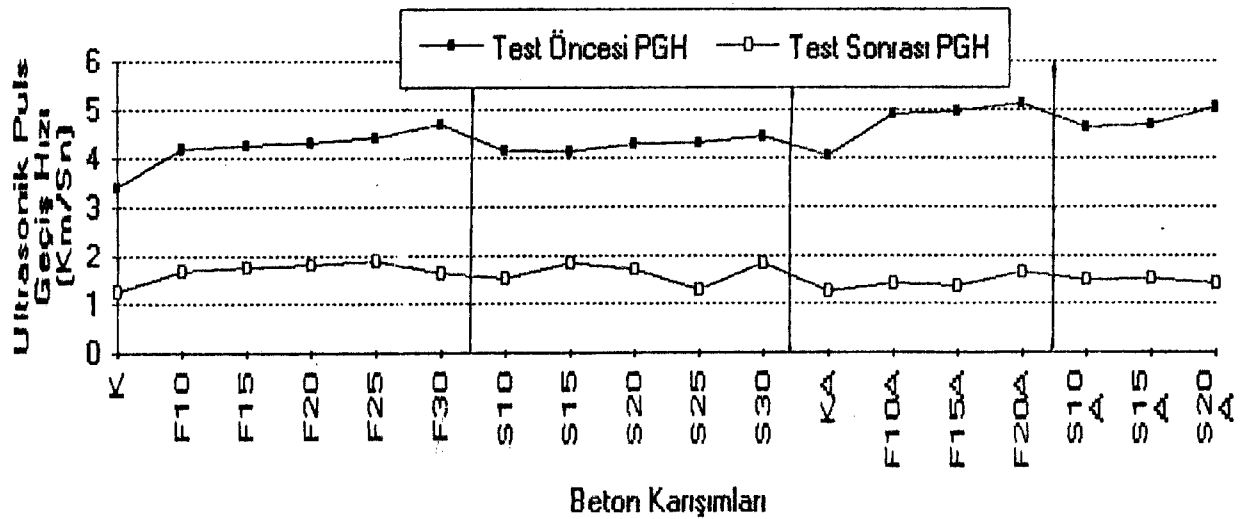
Şekil 7.13, Çarpma Deneyi Genel Karakteristik Sonuçlarının Eşdeğer Küp Basınç Dayanımına (EKBD) Dönüştürülmesi

Tablo 7.8, Çarpma Uygulaması Öncesi Deneme
Karışımlarının Genel Karakteristikleri

	Numune Ağırlığı (g)	Ultrasonik Puls Geçiş Hızı (km/s)	Basınç Dayanımı (MPa)
K	2358.2	3.32	27.3
F10	2449.8	4.13	37.1
F15	2653.1	4.20	38.4
F20	2510.9	4.25	41.2
F25	2696.8	4.35	45.8
F30	2425.7	4.62	47.0
S10	2463.2	4.12	36.1
S15	2523.0	4.14	37.9
S20	2350.3	4.21	38.6
S25	2559.3	4.29	44.8
S30	2320.1	4.52	46.1
KA	2641.3	4.02	33.9
F10A	2511.5	5.02	51.1
F15A	2289.9	5.13	54.6
F20A	2580.6	5.34	56.8
S10A	2629.5	4.56	47.5
S15A	2491.9	4.62	49.4
S20A	2521.0	5.08	52.3

Tablo 7.9, H=25 cm İçin Çarpma Deneyi Sonuçları

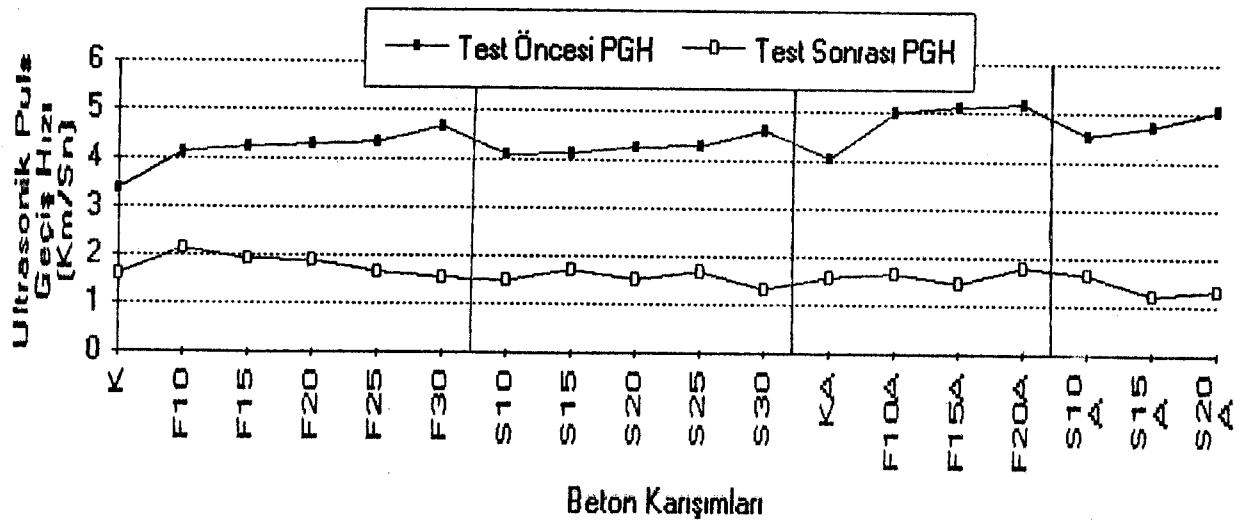
	ADS	Darbe Öncesi Ağırlığı (gr)	Darbe Sonrası Ağırlığı (gr)	Ağırlık Kaybı (gr)	Darbe Öncesi Puls Hızı (km/sn)	Darbe Sonrası Puls Hızı (km/sn)	EKBD (MPa)
K	5	2493.2	1536.1	957.1	3.41	1.24	13.0
F10	6	2440.1	1293.8	1146.3	4.20	1.68	16.0
F15	6	2518.2	1436.1	1082.1	4.28	1.74	16.5
F20	6	2490.1	1501.4	988.7	4.32	1.81	17.0
F25	6	2664.2	1670.3	993.9	4.43	1.88	18.0
F30	6	2419.2	1449.2	970.0	4.69	1.62	16.0
S10	6	2455.6	1194.8	1260.8	4.15	1.52	15.0
S15	6	2560.6	1478.0	1082.6	4.13	1.82	17.0
S20	6	2344.9	1478.2	866.7	4.29	1.71	15.0
S25	6	2550.1	1549.1	1001.0	4.33	1.26	13.0
S30	6	2480.8	1451.0	1029.8	4.46	1.82	17.0
KA	6	2474.6	1435.7	1038.9	4.06	1.25	13.0
F10A	8	2563.4	1423.6	1139.8	4.92	1.41	14.5
F15A	8	2410.2	1418.8	991.4	4.96	1.35	14.0
F20A	8	2526.6	1425.1	1101.5	5.14	1.65	16.0
S10A	8	2514.3	1347.4	1166.9	4.64	1.48	15.0
S15A	8	2486.6	1403.4	1083.2	4.71	1.52	15.0
S20A	8	2456.1	1429.0	1027.1	5.04	1.40	14.5



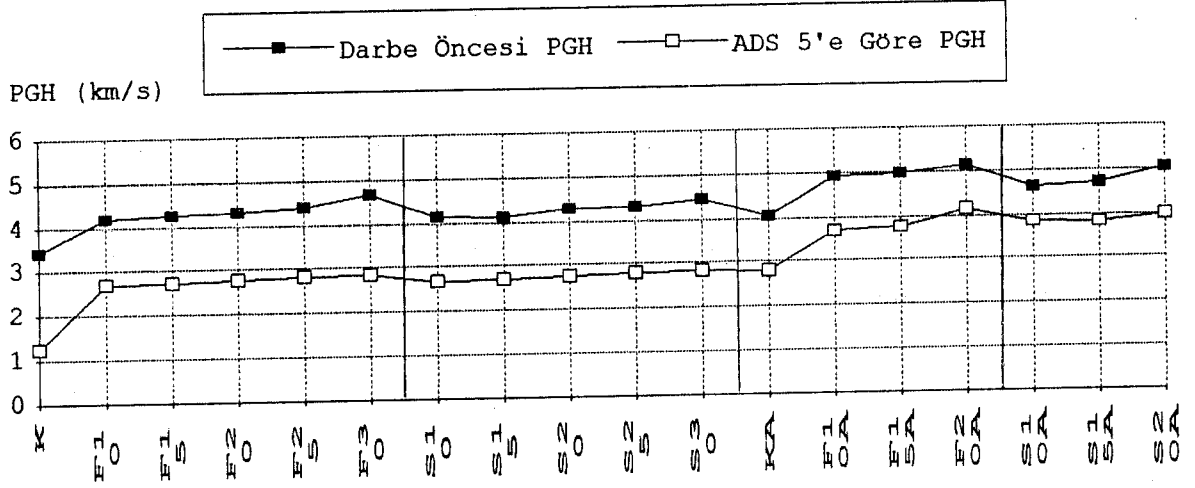
Şekil 7.14, H=25 cm İçin Çarpma Dayanımı

Tablo 7.10, H=35 cm İçin Çarpma Deneyi Sonuçları

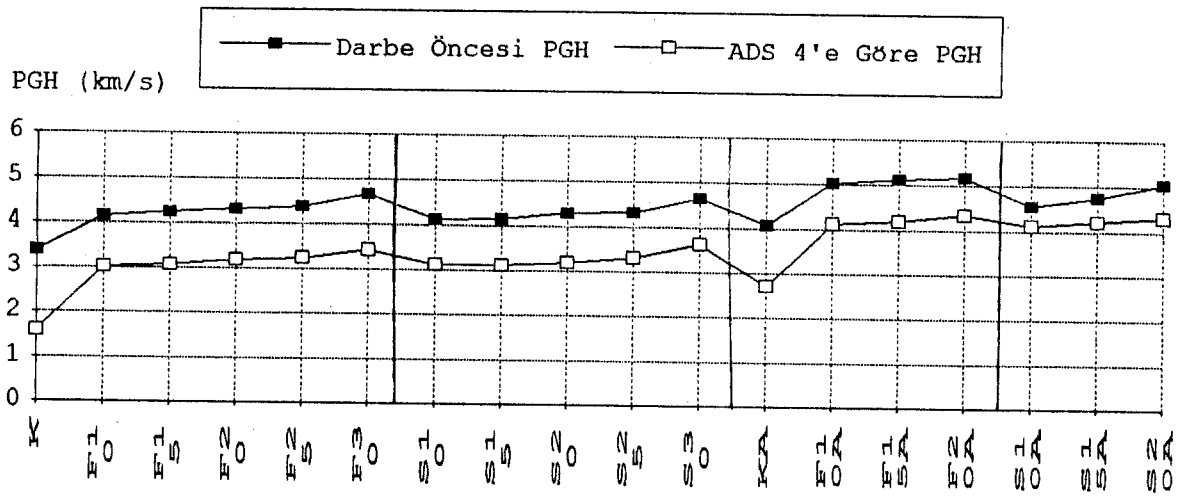
	ADS	Darbe Öncesi Ağırlığı (gr)	Darbe Sonrası Ağırlığı (gr)	Ağırlık Kaybı (gr)	Darbe Öncesi Puls Hızı (km/sn)	Darbe Sonrası Puls Hızı (km/sn)	EKBD (MPa)
K	4	2510.3	1824.0	686.3	3.38	1.60	16.0
F10	6	2546.6	1461.4	1085.2	4.14	2.12	22.5
F15	6	2426.6	1396.0	1030.6	4.24	1.90	18.0
F20	6	2604.6	1397.2	1207.4	4.30	1.89	18.0
F25	6	2380.4	1241.5	1138.9	4.36	1.65	16.0
F30	6	2455.6	1355.4	1100.2	4.67	1.54	15.0
S10	6	2516.5	1424.8	1091.7	4.10	1.49	15.0
S15	6	2419.2	1290.0	1129.2	4.14	1.71	16.5
S20	6	2566.1	1418.8	1147.3	4.27	1.52	15.0
S25	6	2444.1	1174.6	1269.5	4.30	1.68	16.0
S30	6	2432.1	1148.5	1283.6	4.63	1.32	14.0
KA	5	2329.4	1377.2	952.2	4.05	1.57	15.0
F10A	7	2551.1	1363.2	1187.9	5.01	1.65	16.0
F15A	7	2390.6	1315.5	1075.1	5.12	1.46	13.5
F20A	6	2498.1	1417.3	1080.8	5.17	1.79	16.5
S10A	7	2475.6	1552.4	923.2	4.53	1.63	16.0
S15A	6	2563.1	1424.3	1138.8	4.73	1.21	13.0
S20A	6	2349.9	1344.1	1005.8	5.05	1.31	13.5



Şekil 7.15, H=35 cm İçin Çarpma Dayanımı



Şekil 7.16, ADS= 5 ve H=25 cm İçin Çarpma Dayanımı



Şekil 7.17, ADS= 4 ve H=35 cm İçin Çarpma Dayanımı

7.7.3. Tartışma

FeSi ve SiFeCr'un değişik oranlarda PC'ye katılması sonucunda elde edilen betonların çarpma olayı karşısındaki davranışları şöyle gerçekleşmiştir:

Tablo 7.9 ve 7.10'daki sonuçlara ve Şekil 14 ve 15'e göre betonlarda SD katkı oranı arttıkça ardışık çarpma olayına karşı daha iyi dayanım gösterebilmektedirler. Ardışık çarpmalarda meydana gelen ağırlık kaybı sonuçlarıyla çarpma dayanımı arasında bir ilişki ise kurulamamıştır. Silis dumanlarından FeSi katkılı betonlar ardışık çarpmaya karşı daha dayanıklı olabilmektedirler. Her iki SD katkı oranının %20'nin üstüne çıkartılması durumunda olumlu etki biraz daha azalmaktadır.

Plastik kıvamda hazırlanmış betonların çarpma olayı karşısındaki gerek ağırlık ve gerekse dayanımlarını kaybetmeleri S/B oranı 0.40 olan karışımlara göre yüksektir. Bu kıvamdaki betonlarda, ağırlık kayıpları; agregaların hemen hemen yarısına yakını ortadan kırılma şeklinde ana kütleden koparak ayrılma, diğer yarısı ise yuvadan kopma şeklinde, olmuştur. S/B oranı 0.40 olan betonlarda ağırlık kayıplarının yarısından fazlası agregaların ortadan yarılmaları şeklinde geriye kalan kısımda ise yuvadan kopma şeklinde olmuştur. FeSi ve SiFeCr oranı yüksek olan karışımlarda (%20) agregaların ortadan yarılarak ana kütleden kopma olayı çok daha yüksektir.

Ardışık çarpma uygulaması sonunda hasar görmüş betonların, PGH değerleri FeSi ve SiFeCr oranı fazla olanlarda daha yüksektir. Bu sonuç, ardışık çarpma bitiminde dahi yüksek karışım oranlı betonların sahip oldukları dayanımların tamamını henüz kaybedilmedikleri şeklinde açıklanabilir. Ayrıca bu olay, yüksek FeSi ve SiFeCr dumanlı betonların kontrol betonlarına oranla çarpma olayına karşı daha dayanıklı

olmaları SD'nin beton içindeki büyük boşlukları kapatmasının yanısıra, daha küçük yapıda boşlukların oluşturması şeklinde açıklanabilir.

Ayrıca, Şekil 7.16 ve 7.17'de verilen aynı ADS esasına göre de SD katkılı betonlardan FeSi katkılı olanlar SiFeCr katkılılara göre daha dayanıklı olabilmektedirler.

Sonuç olarak, SD katkı betonlar; sıkça cisimlerin düşme veya değişik farklı şiddetdeki kuvvetlerin etkisi altında bulunan havameydanı, liman, karayolu; merdiven, döşeme ve plakları, perde duvar, köprü yaklaşım dolgularının kaplanması, demiryolu sanat yapıları, yüksek titreşimli endüstriyel yapılar vb. inşaatlarda kullanılabilir.

7.8. Kuruma Rötresi ve Şişme

7.8.1. Giriş

Rötrenin kelime anlamı hacim büzülmesidir. Betonlarda rötire türleri çok çeşitlidir ve farklı nedenlere dayanan türleri vardır. Bunlar, termik rötire, hidrolik rötire (sertleşmiş beton rötresi veya kuruma rötresi), bünyesel rötire, erken rötire (plastik rötire) ve karbonatlaşma rötresidir. Bunlardan hidrolik rötire, üretimi izleyen günden itibaren başlaması ve uzun süre devam etmesinden dolayı araştırma kapsamına alınmıştır. Araştırma süresince hidrolik rötire, kuruma rötresi olarak ifade edilmiştir. Su içinde kalan beton zamanla çok küçük değerlerde olsa dahi bir miktar şişme gösterir. Betonların rötire ve şişme yapması istenmeyen bir özeliştir. Rötire ve şişme yapıları durumunda ise bunun çok küçük miktarlarda olması istenir.

Rötreye etki eden faktörler; kullanılan malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yapının türü ve atmosfer şartları ile ilgili, üç grup altında toplanmaktadır. Havanın rutubet derecesinin düşük olması, buharlaşmayı kolaylaştırması nedeniyle, rötreyi büyük miktarda artırır. Bu itibarla, kuru havada korunan betonlar rutubetli mahallerde bırakılmış bulunan betonlara nazaran daha fazla rötreye yapar. Havanın rüzgarlı olması da aynı nedenle rötrenin artmasına neden olur.

Betonun boyutlarındaki uzama veya kısalma çimento etkisi ile olan bir olaydır. Bu itibarla boyutlardaki değişiklik zamanla birlikte artmakta ve beton ancak üretimden bir yıl geçtikten sonra boyut bakımından kararlı bir durum kazanmaktadır.

Beton elemanlarının rötresi S/V^2 ile orantılıdır. Burada S= hava ile temas eden beton yüzeyi, V= beton hacmidir. Yani, beton elemanının hacmi ne kadar büyük ise rötreye o derecede küçük değerler almaktadır. Beton değişik atmosfer şartlarının etkisi altında bulunmaktadır. Havanın rutubet derecesi bir çok yerde önemli değişiklikler göstermektedir. Bu nedenle yapılardaki betonun rötreye değişimi belirli bir seyir izlememektedir (Postacıoğlu, 1966).

Rötrenin esası henüz tam anlamıyla anlaşılmamış ise de, bu olayın beton jel gözeneklerindeki suyun buharlaşması sonucunda oluştuğu ileri sürülmektedir. Buharlaşma yolu ile betonu terk eden su ne kadar fazla ise o oranda rötreye büyük değerler almaktadır. Ayrıca, buharlaşmayı artıran bütün faktörlerin rötrenin artmasına neden olduğu bilinmektedir.

7.8.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

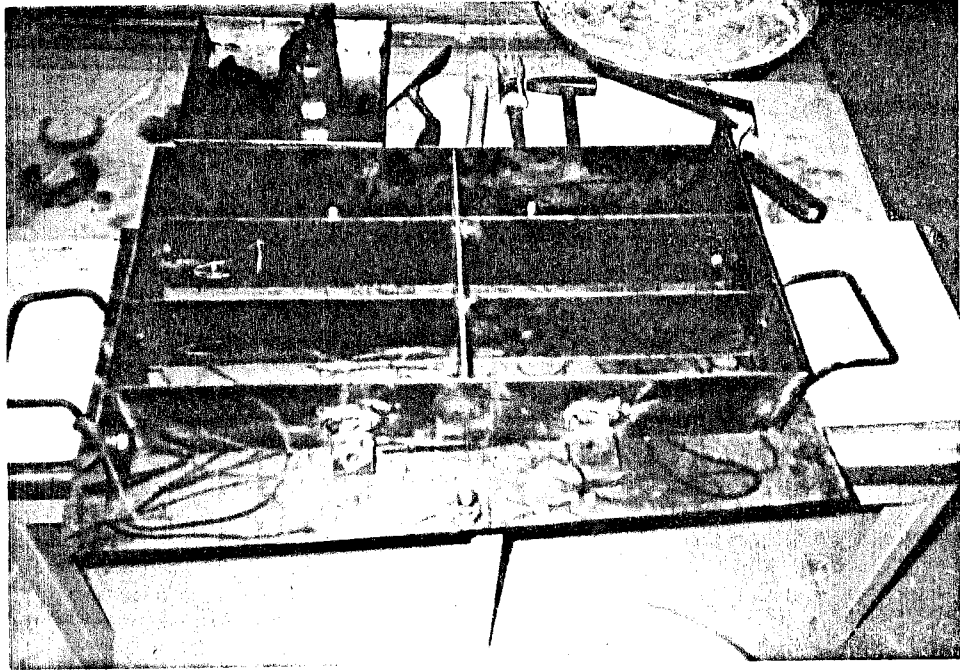
Plastik kıvamda üretilen (yaklaşık 80 mm. çökme yapabilen) betonlarda SD oranı %10, 15, 20, 25 ve 30'dur. SA kullanılarak S/B oranının 0.40 düzeyinde tutulan betonlarda ise SD oranı %10, 15 ve 20'dir.

Sertleşmiş betonlarda kuruma rötresi deneyi, TS 3453 ve aşağıda belirtilen esaslara göre yapılmış olup, elde edilen kuruma rötresi sonuçları Tablo 7.11'de ve şişme (genleşme) sonuçları ise Tablo 7.12'de verilmiştir. Sertleşmiş betonlarda kuruma rötresi, deney numunesinin kuruması sonucu oluşan boy kısalmasının başlangıç boyuna oranıdır. Sertleşmiş betonlarda şişme oranı ise, deney numunesinin su içerisinde tutulması sonucu oluşan şişmenin başlangıç boyuna oranıdır.

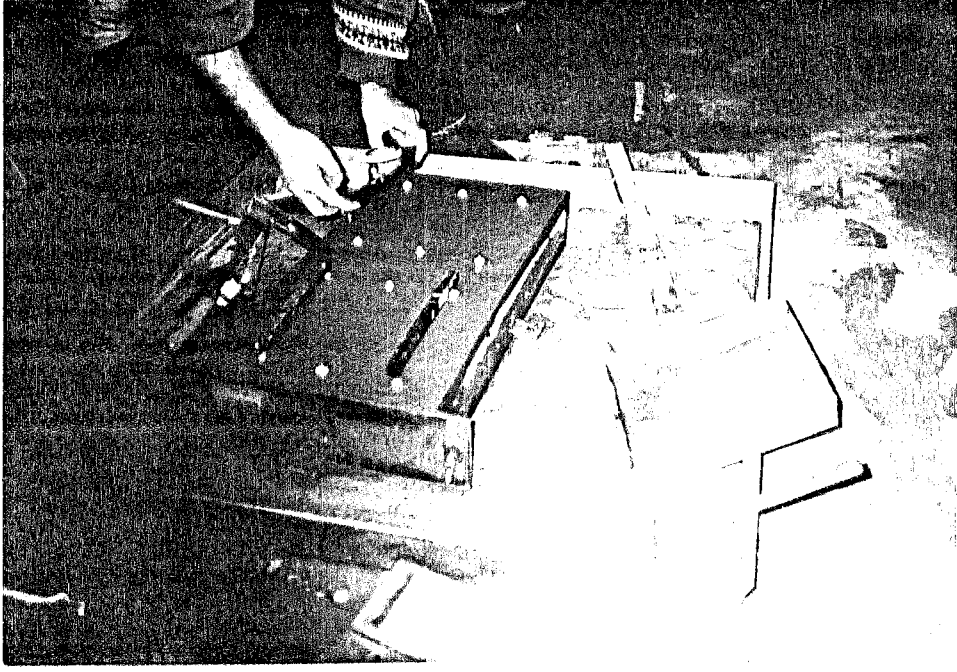
Sertleşmiş betonlarda kuruma rötresi için Tablo 4.5'deki karışım oranları TS 3068'e uygun şekilde, laboratuvarında hazırlanır. Karışımın çökme değeri TS 2871 esasına göre belirlenir. Belirlenen su miktarına göre her deney için 3 numunelik karışım hazırlanır. Taze beton karışımları bu deney için özel olarak üretilmiş 100x100x300 mm ölçülerindeki prizmatik kalıplara iki tabaka halinde yerleştirilir ve her tabakada sıkıştırma çubuğu ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılır. Betonların üretiminde kullanılan çelik kalıp (Fotograf 7.11) F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Metalurji Eğitimi Bölümü Metal Atelyesinde üretilmiştir.

Kromdan üretilmiş ölçüm pimleri, numune içerisine 15 ± 0.5 mm. uzunlukta ve numunenin ana eksenine doğrultusunda yerleştirilir (Fotograf 7.8). Ölçüm pimleri yerleştirilen numuneler, su tankına konulmak üzere %90 bağıl nem ve $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'deki ortamda kuruma altına alınır. Bu konumda bir tam gün bekletildikten sonra $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de değişmez sıcaklıktaki su tankında 14 tam gün bekletilir. 14. gün sonunda su tankındaki

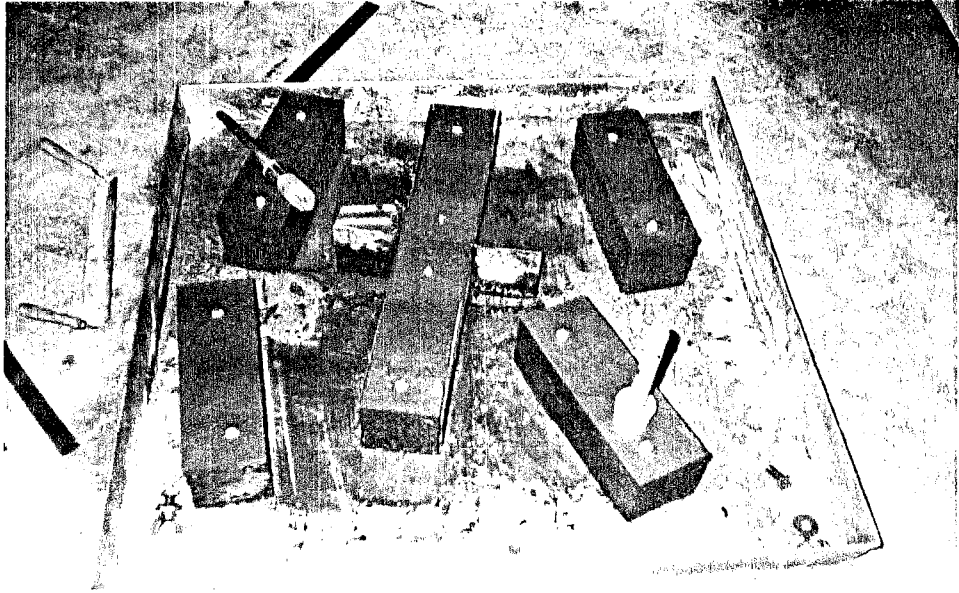
numuneler üzerinde 1. gün okuması alınır. Karışımların yarısı laboratuvar ortamında havada (Fotograf 7.9) diğer yarısı ise yine su tankında (Fotograf 7.10) bekletilerek okuma alınmasına devam edilir. Su içindeki okumalarda bir hataya düşmemek için deney numuneleri su tankında ölçüm aleti (komparatör) ise su yüzeyinde tutularak yapılır. Havada bekletilecek numunelerin her yüzeyinde hava sürkilasyonu olacak şekilde yerleştirilir. Numuneler 25x6 mm kesitli su emmez özelikte takoz üzerinde ve her iki numune arasında ise minimum 30 mm boşluk kalacak şekilde yerleştirilir. Havada ve su tankı içindeki numunelerin en son okumaları yapılincaya kadar hiçbir darbeye, harekete maruz bırakılmaması ve yerlerinin değiştirilmemesi sağlanmıştır. Havada ve su tankında korunan numunelerin diğer okumaları 3, 7, 14 ve 28. gün ve 8, 16, 32 ve 52. haftadır. Karışımların havada korunması sonucu oluşan kurumadan dolayı büzülme, suda korunmaları sonucu ise şişme değerleri elde edilir.



Fotograf 7.6, Betonlarda Kuruma Rötresi ve Şişme İçin Yapılan Çelik Kalıp



Fotograf 7.7, Ölçüm Pimlerinin Yerleştirilmesi



Fotograf 7.8, Numunelerin Kalıplardan Çıkarılması



Fotograf 7.9, Havada Korunan Beton Numuneleri



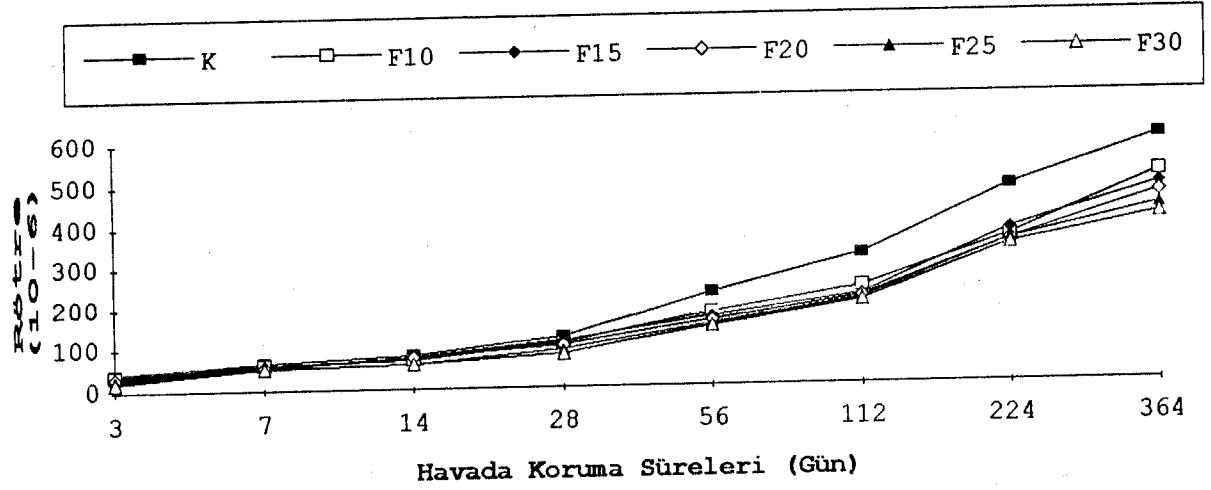
Fotograf 7.10, Suda Korunan Beton Numuneleri

Tablo 7.11, Kuruma Rötresi Deney Sonuçları

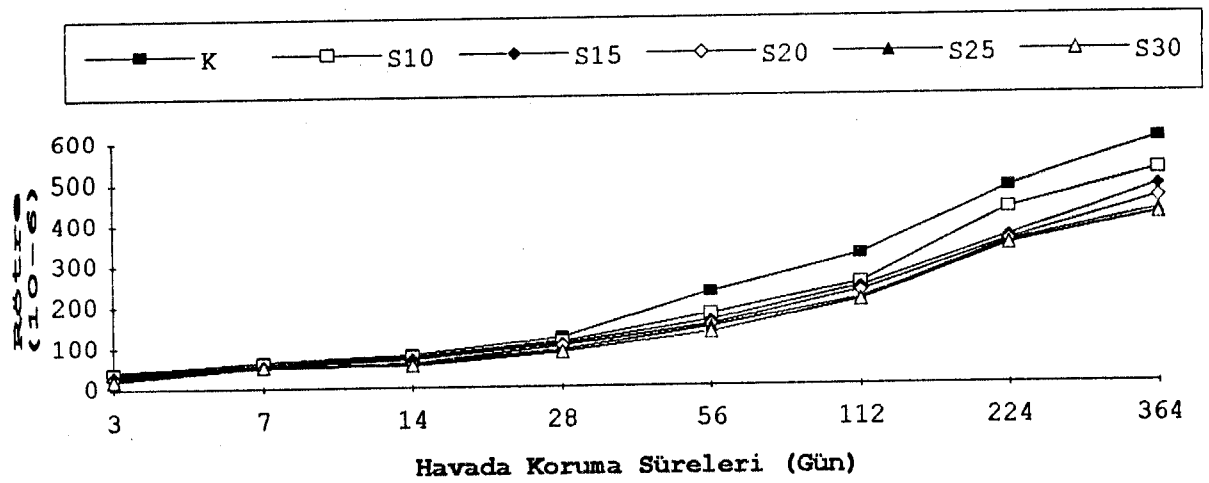
	Kuruma Rötresi (10^{-6})							
	3. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün	8. Hafta	16. Hafta	32. Hafta	1. Yıl
K	40	65	80	120	230	360	540	650
F10	35	60	70	105	180	240	360	510
F15	30	55	75	110	170	220	375	480
F20	30	55	75	100	160	215	350	460
F25	25	50	60	90	150	210	350	430
F30	20	50	60	80	145	205	340	410
S10	35	60	75	110	175	250	450	520
S15	30	55	70	105	160	240	360	485
S20	25	50	60	100	150	230	350	455
S25	25	50	60	90	145	210	345	425
S30	20	50	55	85	130	205	340	415
KA	35	50	70	100	200	340	480	540
F10A	30	45	60	90	150	220	315	450
F15A	25	40	50	80	120	210	305	420
F20A	15	40	45	70	120	200	300	390
S10A	30	50	55	95	160	230	340	470
S15A	25	45	50	90	140	225	320	440
S20A	10	40	40	85	130	210	305	395

Tablo 7.12, Şişme Deney Sonuçları

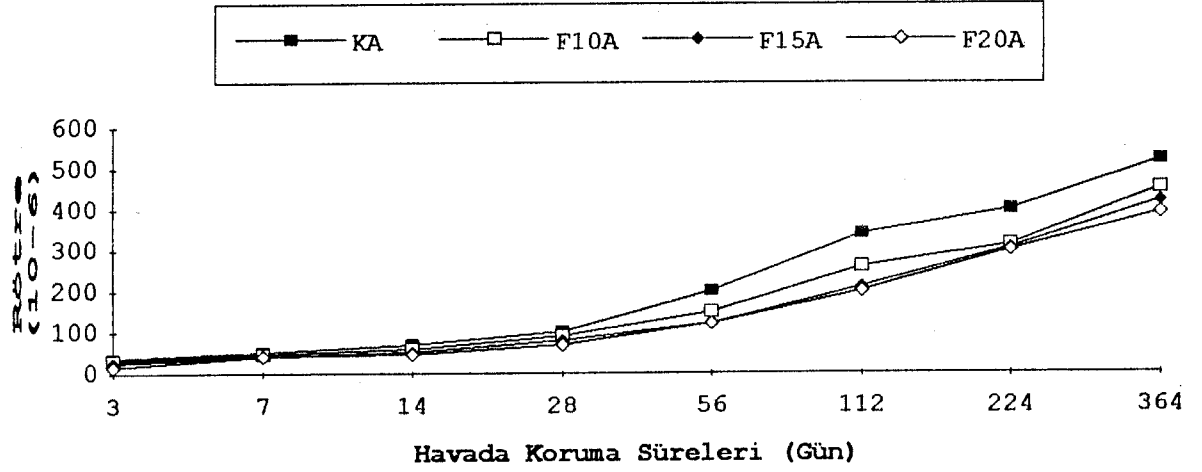
	Şişme (10^{-6})							
	3. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün	8. Hafta	16. Hafta	32. Hafta	1. Yıl
K	30	50	80	190	280	330	370	400
F10	30	50	70	160	250	305	340	375
F15	25	45	60	160	240	280	345	360
F20	35	55	60	145	235	270	320	340
F25	40	40	55	140	230	255	315	325
F30	20	35	50	125	220	240	290	310
S10	40	40	75	180	280	320	355	380
S15	35	40	70	170	260	310	325	350
S20	25	35	60	165	255	300	315	340
S25	20	30	60	150	240	270	295	330
S30	20	30	55	145	225	255	280	325
KA	30	45	70	180	240	310	335	380
F10A	25	40	60	145	220	280	330	360
F15A	25	40	55	140	205	260	320	330
F20A	20	25	45	110	195	240	290	300
S10A	30	40	60	150	225	290	340	360
S15A	20	30	50	135	210	270	305	320
S20A	20	25	45	120	200	260	290	310



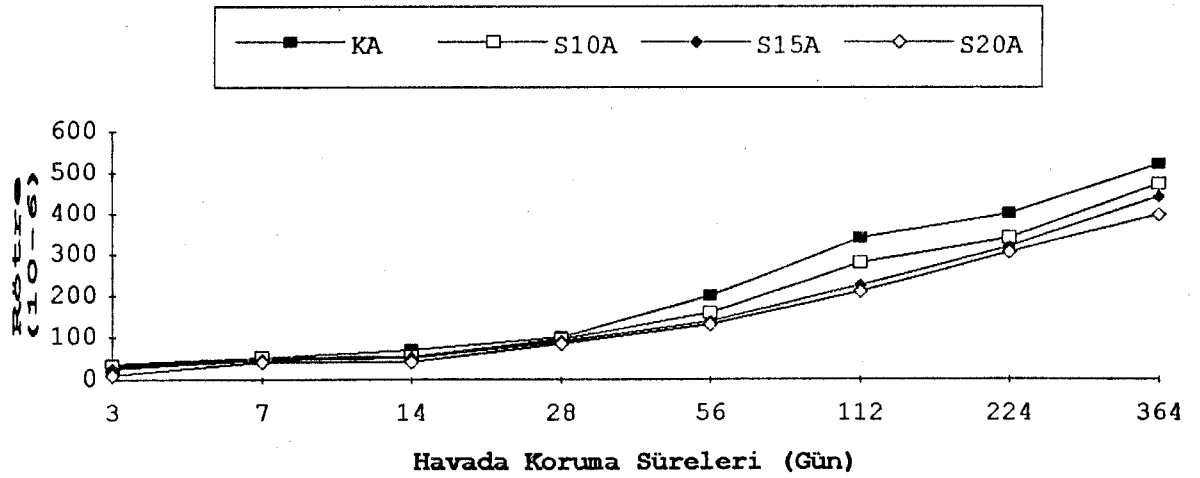
Şekil 7.18, FeSi Katkılı Betonlarda Kuruma Rötresi



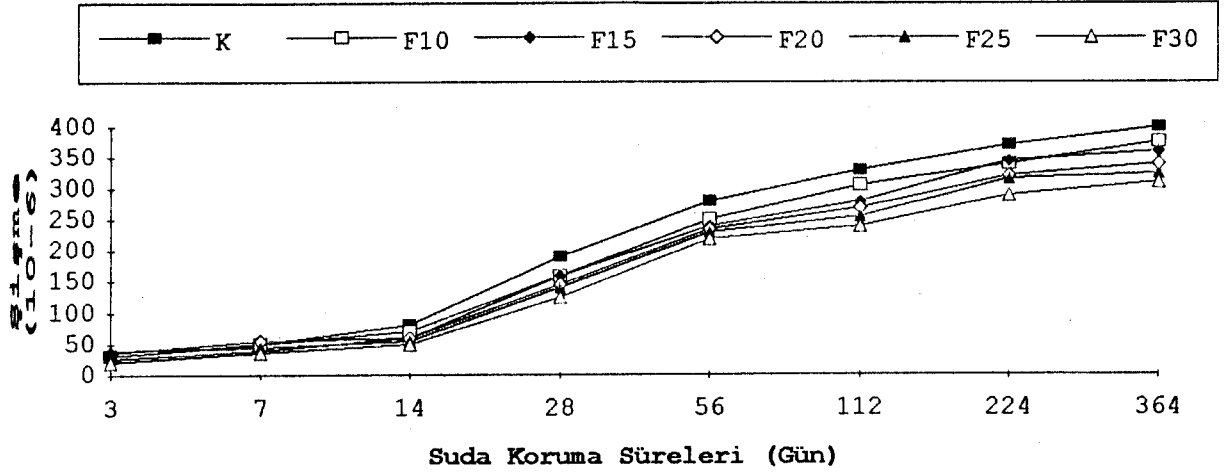
Şekil 7.19, SiFeCr Katkılı Betonlarda Kuruma Rötresi



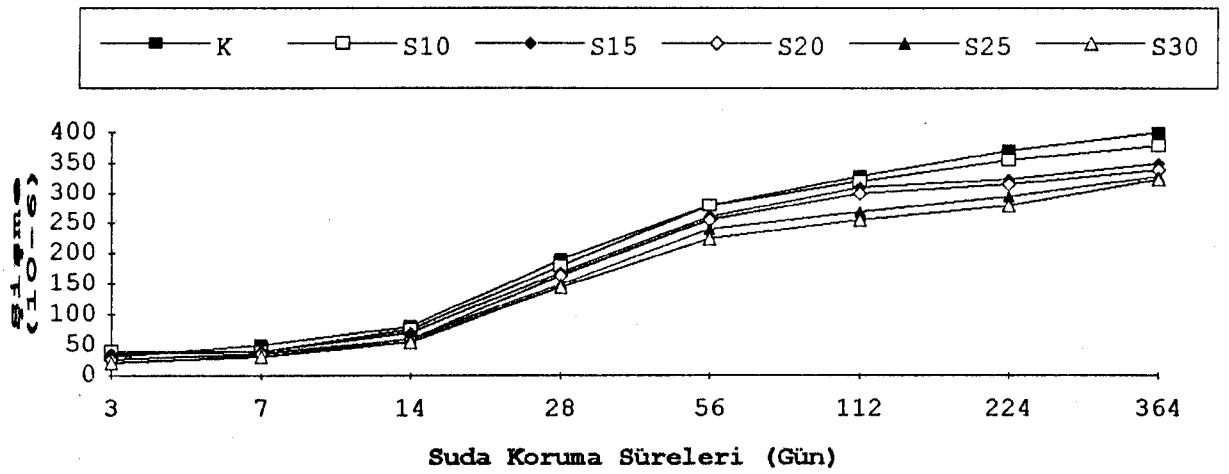
Şekil 7.20, SA Katkılı FeSi'li Betonlarda Kuruma Rötresi



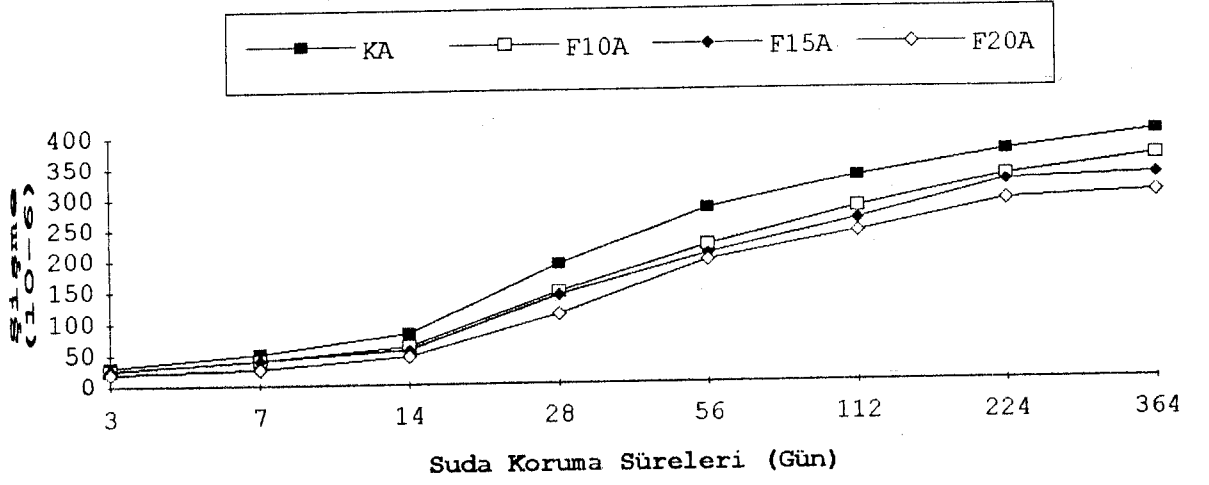
Şekil 7.21, SA Katkılı SiFeCr'lu Betonlarda Kuruma Rötresi



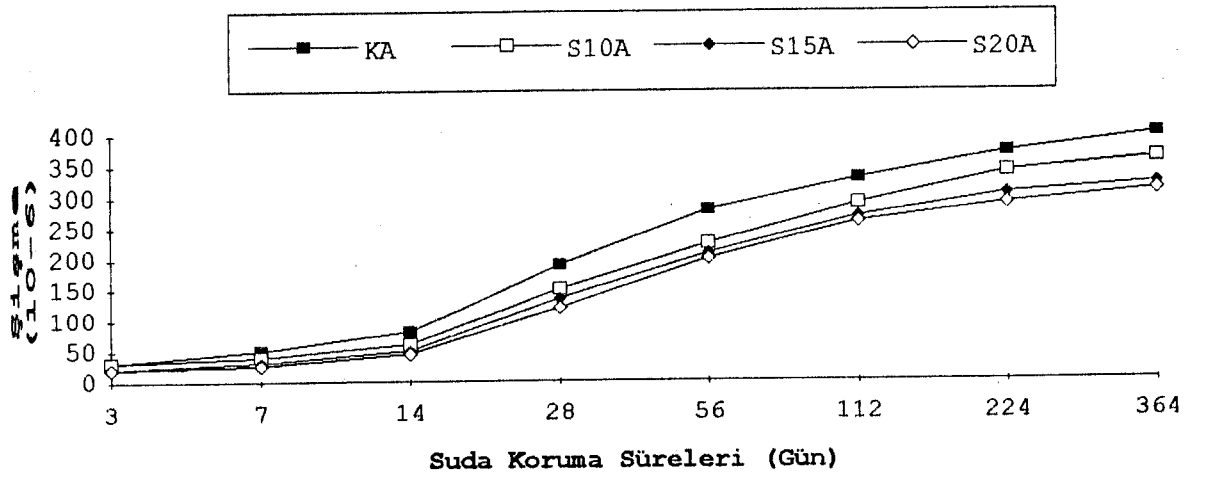
Şekil 7.22, FeSi Katkılı Betonlarda Şişme



Şekil 7.23, SiFeCr Katkılı Betonlarda Şişme



Şekil 7.24, SA Katkılı FeSi'li Betonlarda Şişme



Şekil 7.25, SA Katkılı SiFeCr'lu Betonlarda Şişme

7.8.3. Tartışma

FeSi ve SiFeCr'un değişik oranlarda PÇ'ye katılması sonucunda elde edilen betonların kuruma rötresi ve şişme (genleşme) olayı şöyle gerçekleşmiştir:

Tablo 7.11'deki değerlere ve Şekil 7.18, 7.19, 7.20 ve 7.21'e göre %10 SD ile kuruma rötresi kontrol karışımının %78 mertebesine inmekte ancak daha fazla katılan SD ile kuruma rötresinde ilave azalma %15 civarında kalmaktadır. Tablo 7.12'deki değerlere ve Şekil 7.22, 7.23, 7.24 ve 7.25'e göre SD ile şişme kontrol karışımının %94 mertebesine inmekte ancak daha fazla katılan SD ile şişmedeki azalma %16 civarında kalmaktadır. FeSi katkılı betonlar SiFeCr katkılı olanlara kıyasla daha az kuruma rötresi ve şişme gösterebilmektedir. Plastik kıvamda hazırlanmış betonların kuruma rötresi ve şişme karışısındaki davranışları S/B oranı 0.40 olan SA'lı karışımlara göre daha yüksektir. Tablo 7.11 ve 7.12'deki sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, betonlarda S/B oranı düştükçe ve SD oranı arttıkça kuruma rötresi ve şişmede önemli ölçüde düşüş olabilmektedir. SD katkılı ve katkısız betonlardaki kuruma rötresi şişme miktarından daha büyüktür.

SD katkılı ve katkısız betonların Şekil 7.18, 7.19, 7.20, 7.21, 7.22, 7.23, 7.24 ve 7.25'deki kuruma rötresi ve şişme miktarları, Akman'ın (1987) öne sürmüş olduğundan daha az, ACI Committee 226 (1987), Malhotra (1991) ve Neville'in (1977) öne sürmüş oldukları ile benzerdir.

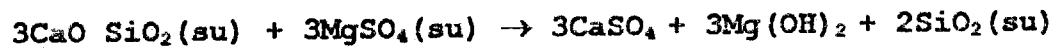
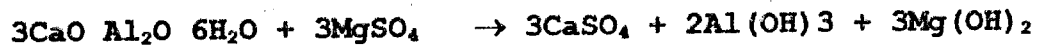
Sonuç olarak, SD katkılı betonlar; sıkça rötre ve/veya şişme (genleşme) etkisi altında bulunan liman, karayolu açık su kanalları, baraj, köprü ayakları, geleneksel ve prefabrik yapı elemanları vb. inşaatlarda kullanılabilir.

7.9. Zararlı Kimyasallara Dayanıklılık

7.9.1 Giriş

Bilindiği üzere dış ortam sertleşmiş betonu fiziksel ve kimyasal yünden hasara uğrattır. Fiziksel özelliklerden donma-çözülme, çarpma ve sürtünme yolu ile aşınma konusu daha önce incelendi. Kimyasal etkenler arasında asitli, sülfatlı, klorlu suların ve atmosferin varlığı sayılabilir.

Beton, sülfatlı sularla etkileştiğinde, şişer ve yüzeyi beyaz, yumuşak ve hamur gibi yapışkan bir görünüme bürünür. Betona en çok zarar veren amonyum, magnezyum, sodyum ve kalsiyum sülfat hallerindeki sülfatlardır. Diğerleri ise daha az zarar verir. $MgSO_4$, $CaSO_4$ 'den daha fazla zararlı etkiye sahiptir. Çünkü, $MgSO_4$, kalsiyum silikatın yanısıra, aşağıdaki reaksiyona göre, hidrate çimento pastalarını oluşturan diğer kalsiyum bileşikleri ile de reaksiyona girer.



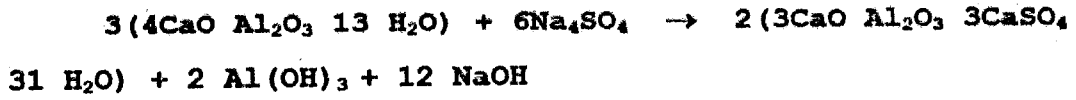
Bu reaksiyonlarda oluşan kalsiyum sülfat, alümin hidratlarla reaksiyona girebilir ve yaygın etrenjit oluşumuna neden olabilir. Etrenjit tuzlarının çimento hamuru gözeneklerinde kristalleşmesi ise betonun genleşmesine neden olur.

Bu reaksiyonlar nedeniyle, $MgSO_4$ 'ün betona zararlı etkisi oldukça karışık olup, basit bir başlık altında toplamak oldukça güçtür. Şayet, magnezyum iyolarının konsantrasyonu düşük ise (100 mg/lt) ve beton kompozit ise

yukarıdaki reaksiyonlar sadece yüzeyde olur. Yüzeyde oluşan reaksiyonlar sonucu $Mg(OH)_2$ yüzey gözeneklerinde çökelmekte ve daha fazla $MgSO_4$ 'ün çökmesini engellemektedir. Ayrıca, $MgSO_4$ silikatlar gibi davranabilir. Bu nedenle, $MgSO_4$ 'ün zararlı etkileri puzolanlı ve curufllu çimentolardaki gibi uzatılmış olur. Sudaki Na_2SO_4 hidroliz kireciyle aşağıdaki denklemde olduğu gibi reaksiyona girer.



Na_2SO_4 aşağıda verilen denkleme göre oluşan ve çok geniş halde kristalleşen alçıtaşıdan dolayı zararlıdır. Na_2SO_4 ayrıca, aşağıdaki reaksiyonda gösterilen mekanizmaya göre kalsiyum alüminatları da etkiler. Aşağıdaki reaksiyon kalsiyum sülfoalüminatın oluşmasına yol açar.



Özetle, sülfatlar, sertleşmiş çimentoda bulunan trikalsiyum alüminat (C_3A) ile birleşerek trikalsiyum sülfoalüminat hidratını oluşturur ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$). Bu bileşik, molekülünde 31 molekül hidrat suyu bulundurduğundan betonda şişmelere ve kabuklanmalara neden olabilir. Magnezyum sülfat, sertleşmiş çimentodaki kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek, yumuşak ve jeletinimsi bir madde olan magnezyum hidroksiti oluştururlar.

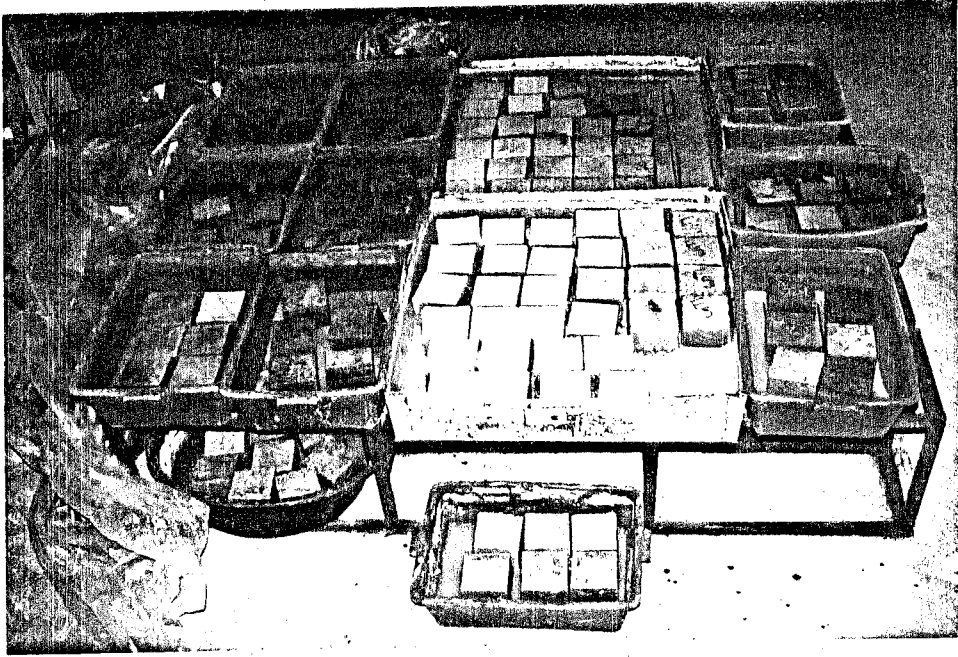
7.9.2. Deney yöntemi ve sonuçlar

Sertleşmiş betonlarda zararlı kimyasallara dayanıklılık sülfatlı (Na_2SO_4 ve $MgSO_4$) suların etkileri araştırma

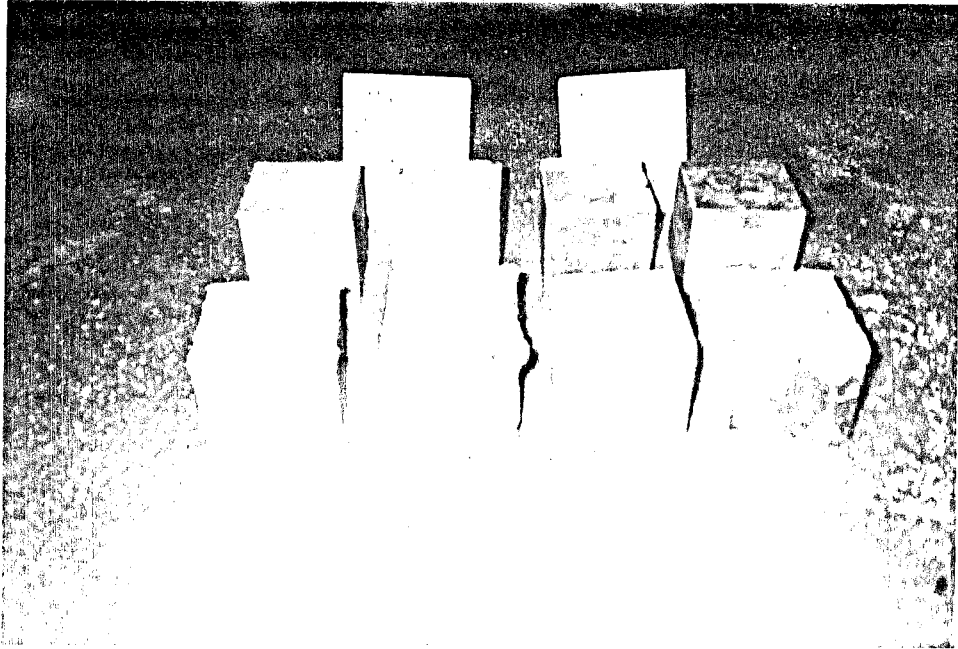
kapsamına alınmış olup, aşağıda açıklanan özel yöntemle elde edilen sonuçlar Tablo 7.13'de verilmiştir. Zararlı kimyasallara dayanıklılık deneyi için Tablo 4.5'deki karışım oranlarında hazırlanan taze beton karışımları 10 cm'lik küp kalıplara şişlenerek sıkıştırıldıktan sonra, su tankına konulmak üzere, %90 bağıl nem ve $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'deki ortamda koruma altına alınır. Bu konumda bir tam gün bekletildikten sonra $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'de değişmez sıcaklıktaki su tankında deney yaşına kadar bekletilir. 28. gün sonunda tüm karışımlar aşadaki çözeltilere maruz bırakılmıştır (Fotograf 7.11).

Çözelti hazırlamada saf su kullanılmıştır. Her 50 kg(lt) saf su için 4.305 kg MgSO_4 (%4.2) ve 2.5 kg Na_2SO_4 (%5) kullanılmıştır. Kimyasal madde satan firmalarda saf MgSO_4 bulunamadığı için $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ kullanılmıştır.

Sertleşmiş ve 28 günlük yaşını doldurmuş betonlar çözeltilere konulmadan önce ultrasonik test cihazı ile PGH ve şekil itibarıyla yüzey görünümleri tespit edildi. Daha sonra karışımlar 90., 180., 250. ve 360. günkü PGH ve en son yüzey görünümlerine ilişkin görsel dayanıklılık indisleri belirlendi. PGH okunması her defasında aynı yüzeyden ve aynı noktadan alındı. Bu amaç için 105x105x105 mm boyutunda ve iki yüzü açık bir PGH okuma kalıbı (Şablon) üretildi. Bu okuma kalıbı ile, sözkonusu çözeltilerin yıpratıcı etkileri her defasında aynı noktadan ve daha hassas bir şekilde okundu. Yüzey görünümleri Şekil 7.15'de verilen şekil deformasyonları ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Bu şekilde farklı yıpranma aşamaları görsel dayanıklılık indisi (GD) bazında ifade edilmiştir. Zararlı kimyasal çözeltilere maruz bırakılan numunelerin 1 yıl sonu itibarıyla görünümleri Fotograf 7.12'de verilmiştir.



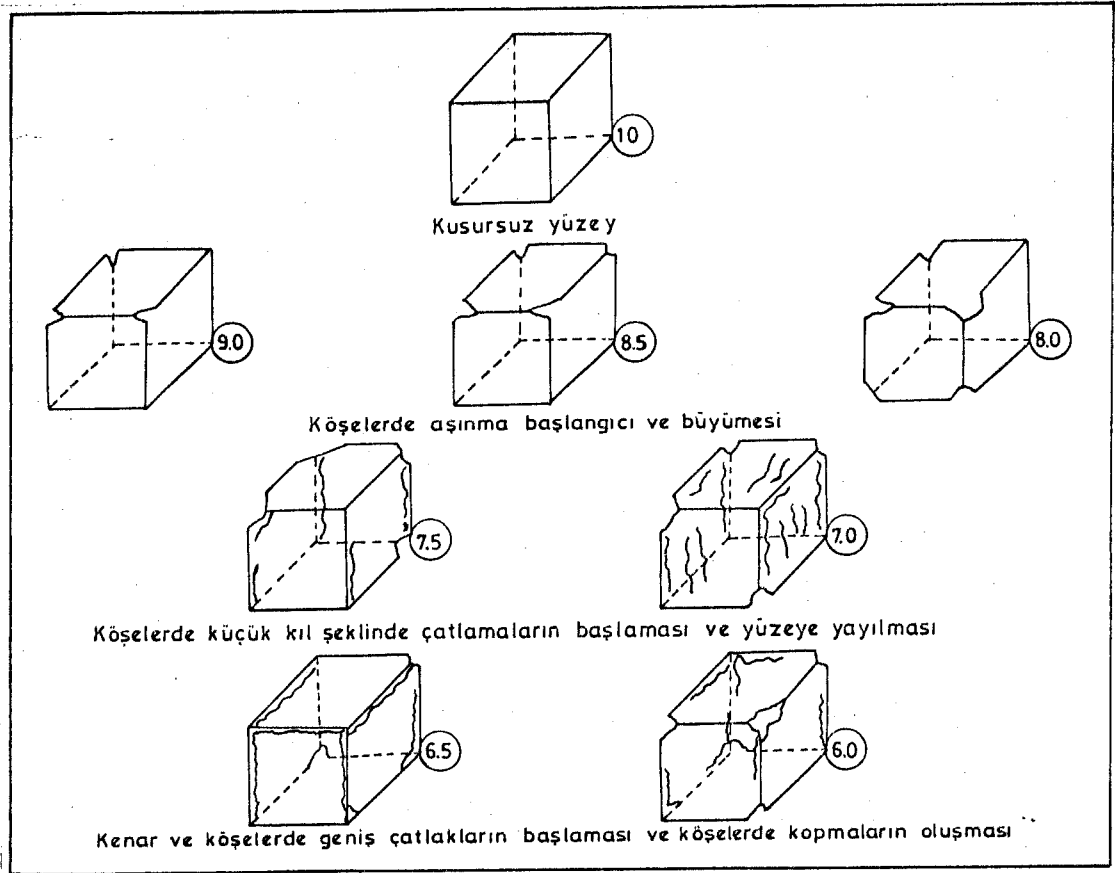
Fotograf 7.11, Zararlı Kimyasal Çözeltiiler İçerisinde Bekletilen Beton Numuneleri



Fotograf 7.12, Kimyasal Çözeltiilerdeki Betonların 1 Yıl Sonu Görünümleri

Tablo 7.13, Zararlı Kimyasallara Dayanıklılık Deney Sonuçları

		28. Gün		90. Gün		180. Gün		250. Gün		360. Gün		§
	Koruma	PGH	GD	PGH	GD	PGH	GD	PGH	GD	PGH	GD	Değişim (360 Gün)
K	MgSO ₄	3.39	10	3.35	10	3.28	9	3.20	8	3.12	6	100
	Na ₂ SO ₄	3.37	10	3.35	10	3.22	9	3.14	9	3.04	8	100
F10	MgSO ₄	4.17	10	4.15	10	4.13	10	4.02	9	3.84	8	123
	Na ₂ SO ₄	4.14	10	4.12	10	4.13	10	4.02	10	3.82	9	126
F15	MgSO ₄	4.15	10	4.15	10	4.14	10	4.08	9	3.82	9	122
	Na ₂ SO ₄	4.20	10	4.20	10	4.20	10	4.12	10	4.01	9	132
F20	MgSO ₄	4.34	10	4.30	10	4.20	10	4.10	10	3.76	9	120
	Na ₂ SO ₄	4.26	10	4.28	10	4.24	10	4.15	10	3.88	9	128
F25	MgSO ₄	4.35	10	4.30	10	4.32	10	4.18	10	3.90	9	125
	Na ₂ SO ₄	4.37	10	4.37	10	4.31	10	4.22	10	4.05	9	133
F30	MgSO ₄	4.61	10	4.61	10	4.20	10	4.16	10	3.86	9	124
	Na ₂ SO ₄	4.66	10	4.65	10	4.59	10	4.50	10	4.28	9	141
S10	MgSO ₄	4.13	10	4.12	10	4.11	10	3.98	9	3.74	8	120
	Na ₂ SO ₄	4.12	10	4.11	10	4.10	10	4.03	9	3.85	8	127
S15	MgSO ₄	4.16	10	4.17	10	4.16	10	4.01	9	3.80	8	122
	Na ₂ SO ₄	4.15	10	4.14	10	4.12	10	4.03	10	3.86	9	127
S20	MgSO ₄	4.22	10	4.22	10	4.20	10	4.13	9	3.91	9	125
	Na ₂ SO ₄	4.22	10	4.23	10	4.18	10	4.06	10	3.85	9	127
S25	MgSO ₄	4.32	10	4.32	10	4.27	10	4.18	10	3.98	9	128
	Na ₂ SO ₄	4.27	10	4.23	10	4.21	10	4.15	10	4.03	9	133
S30	MgSO ₄	4.50	10	4.52	10	4.44	10	4.27	10	4.01	9	129
	Na ₂ SO ₄	4.48	10	4.49	10	4.45	10	4.19	10	3.99	9	131
KA	MgSO ₄	4.98	10	4.95	10	4.85	9	4.56	8	3.80	8	100
	Na ₂ SO ₄	4.05	10	4.04	10	3.90	10	3.81	10	3.33	9	100
F10A	MgSO ₄	5.08	10	5.08	10	5.06	10	5.05	10	4.95	9	130
	Na ₂ SO ₄	5.04	10	5.03	10	5.02	10	4.96	10	4.92	9	148
F15A	MgSO ₄	5.13	10	5.14	10	5.10	10	5.08	10	4.92	9	129
	Na ₂ SO ₄	5.13	10	5.11	10	5.10	10	5.06	10	5.01	9	150
F20A	MgSO ₄	5.18	10	5.18	10	5.18	10	5.12	10	5.01	9	132
	Na ₂ SO ₄	5.17	10	5.16	10	5.18	10	5.12	10	5.10	9	153
S10A	MgSO ₄	4.62	10	4.60	10	4.56	10	4.51	9	4.42	9	116
	Na ₂ SO ₄	4.56	10	4.55	10	4.50	10	4.46	10	4.24	9	127
S15A	MgSO ₄	4.68	10	4.65	10	4.62	10	4.60	10	4.41	9	116
	Na ₂ SO ₄	4.62	10	4.62	10	4.60	10	4.54	10	4.31	9	129
S20A	MgSO ₄	5.06	10	5.06	10	5.01	10	4.98	10	4.84	9	127
	Na ₂ SO ₄	5.11	10	5.11	10	5.10	10	5.06	10	4.93	9	148



Şekil 7.26, Betonların Zararlı Çözeltiler Karşısında Şekil Deformasyonları ve Görsel Dayanıklılık İndisleri

7.9.3. Tartışma

FeSi ve SiFeCr dumanlarının değişik oranlarda PÇ'ye katılması sonucu elde edilen betonların zararlı kimyasal çözeltiler içindeki davranışları şöyle gerçekleşmiştir:

Tablo 7.12'deki sonuçlara göre, $MgSO_4$ 'ün Na_2SO_4 'e göre yıpratıcı etkisi daha fazla olmaktadır. FeSi dumanları SiFeCr dumanlarına kıyasla zararlı kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gösterebilmektedir. Görsel dayanıklılık indisleri açısından ise FeSi ve SiFeCr dumanları birbirine çok yakın davranışlar göstermiştir.

Plastik kıvamda olmak koşuluyla (80 mm çökme sağlayabilen), $MgSO_4$ çözeltisine maruz betonlarda %10 Fesi kullanılması durumunda zararlı etki %23'lük bir dayanıklılık sağlanabilir. Benzer kıvamda ve Na_2SO_4 çözeltisine maruz betonda aynı dumanlarda bu etki %26 olmaktadır.

S/B oranının, SA kullanılarak, 0.40 düşürülmesi durumunda $MgSO_4$ 'te %30 ve Na_2SO_4 'te ise %48'lik bir zararlı etki oluşabilmektedir. Daha yüksek katkı oranlarında bu zararlı etki biraz daha yükseltilebilir.

FeSi ve SiFeCr dumanları ile üretilen betonlarda SD karışım oranı arttıkça daha yoğun bir beton yapısı elde edilmiştir. Bu olay çimento tanelerinden 100 defa daha küçük olan silis dumanlarının küçük gözenek sayısını artırma, büyük gözenekleri azaltması şeklinde açıklanabilir.

Sonuç olarak, SD katkı betonlar; zararlı kimyasal çözelti etkisi altında bulunan havameydanı, liman ve deniz platformları, karayolu, döşeme ve plakları, temel ve perde duvarı, köprü yaklaşım dolguları kaplaması, demiryolu sanat yapıları, kimya endüstrisi yapıları, kanalizasyon ve drenaj künkleri vb. inşaatlarda kullanılabilir.

8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Antalya Etibank Elektrometalurji İşletme Tesisi silis dumanlarının taze ve sertleşmiş hamur, harç ve beton özelliklerine olan etkileri şöyle özetlenebilir:

Hamur numunelerine olan etkileri:

- Priz alma süreleri standard değerlerin üstüne çıkmaktadır. %20'den daha fazla SD katılması durumunda priz hızlandırıcı SA kullanımı kaçınılmaz olmaktadır. Örneğin: %20 FeSi'de priz başlangıcı 5 saat 30 dakika sonra, priz sonu ise TS 24'ün belirttiği 10 saatlik maksimum süre tamamlandıktan sonra gerçekleşmiştir.

- Karma suyu ihtiyacı SD miktarı ile orantılı olarak artmaktadır. %5'den daha fazla SD katılması durumunda süper akışkanlaştırıcı katkı maddelerin kullanımı kaçınılmaz olmaktadır.

- Numunelerin X-ışını difraktogramlarında SD/Ç oranı arttıkça C-S-H bileşikleri çok yoğun bir şekilde her tarafa yayılmakta ve oluşumu daha süratli olmaktadır.

- Anormal bir hacim genleşmesi yapmamaktadır.

- SD katkılı çimentolarda etrenjit gibi zararlı tuz meydana gelmemektedir.

- Numunelerin DTA grafiklerinde görüleceği üzere, SD katkılı çimentolar hidratasyon esnasında endotermik olay (450-550°C'de) ve suyun buharlaşması şeklinde ağırlık değişimi olmaktadır.

- SD/Ç oranı arttıkça aktif SiO_2 , serbest haldeki Ca(OH)_2 'yi daha çok bağlanmasına neden olmaktadır.

Harç numunelerine olan etkileri:

- S/B oranı 0.50 olan karışımlarda SD/Ç oranı arttıkça basınç ve eğilmede çekme dayanımı yükselmektedir. SA kullanılarak S/B oranı 0.40 olan karışımlarda aynı dayanımlar daha yüksek olmaktadır.

- S/B oranı 0.50 olan ve su ve Na_2SO_4 çözeltisinde korunan prizmatik çubukların boy değişim oranı en çok kontrol numunesinde olup SD/Ç oranı arttıkça bu oran düşmektedir. SA kullanılarak S/B oranı 0.40 olan karışımlarda boy değişimi daha az olabilmektedir.

Beton numunelerine olan etkileri:

- 80 mm. çökme sağlanabilmesi için 1 kg SD, 1 kg ilave karma suyuna ihtiyaç (S/B oranının 0.53-0.63 arasında değişen betonlardaki su ihtiyacı) göstermektedir.

- S/B oranı plastik kıvama göre belirlenen karışımlarda SD/Ç oranı arttıkça, basınç dayanımı yükselmektedir. SA kullanılarak S/B oranı 0.40 olan karışımlarda aynı dayanımlar daha yüksek olmaktadır. FeSi dumanları SiFeCr dumanlarına göre daha etkilidirler.

- Plastik kıvama göre hazırlanan kontrol numunesi 100 donma-çözülme tekrarı sonunda elastisite modülü 2.40×10^5 'den 0.3×10^5 'e düşerken, %10 FeSi'de 2.83×10^5 'den 1.79×10^5 'e, %30 FeSi'de ise 3.19×10^5 'den 1.50×10^5 'e düşmektedir.

Yüzde 10, 15 ve 20 FeSi ve SiFeCr dumanları katılarak üretilen betonlarda elastiklik modüllerinde ortalama %60'lık azalma sonucunda betonlar kritik yapıya gelmektedirler. Yüzde 25 ve 30 SD katkı durumunda ise elastisite modülünde %50 civarında bir azalma olmaktadır. Yani %25 ve 30 SD katkısı içeren betonlarda donma-çözülme tekrarlarına dayanıklılık %10, 15 ve 20 SD katkılılara göre azalmaktadır. Bunun nedeni, çimento matrisi fazının çok yoğun olması ve suyun hareketine olanak kalmaması şeklinde açıklanabilir. SA katkılı kontrol betonu (KA) 100. donma çözülme sonunda elastiklik modülünü yaklaşık %70 kaybederek kritik noktaya ulaşırken, diğer betolardan FeSi katkılı olanlar ortalama %35, SiFeCr'lu betonlar ise ortalama %40 elastiklik modüllerini kaybetmektedirler.

- Yüzde 10 SD katkısı ile aşınma kaybı kontrol karışımının %60'ı mertebesine inmekte, ancak daha fazla katılan SD ile aşınmadaki ilave azalma sadece %10 civarında kalmaktadır. Her iki SD ile elde edilen sonuçlar birbirine yakın olmakla birlikte FeSi dumanının biraz daha etkili olduğu gözlenmektedir. SD'nin aşınmayı azaltmadaki etkisi düşük S/B malzeme oranlı beton karışımlarında biraz daha fazladır.

- Düşük S/B oranında (0.40) hazırlanmış beton numuneler çarpma tekrarlarına karşı daha mukavemetli olmaktadırlar. Plastik kıvamda hazırlanmış kontrol betonu (S/Ç oranı 0.53) 5 ardışık çarpma uygulaması sonunda parçalanırken, SA kullanılarak S/B oranının 0.40 düzeyinde tutulması durumunda 6 ardışık çarpma uygulaması sonunda parçalanmaktadır. SD ile üretilmiş betonlar çarpma tekrarlarına karşı daha dayanıklı olmaktadırlar. SD/Ç oranı yükseldikçe ardışık çarpma tekrarları sonunda dayanım kaybı ise daha az

olmaktadır. Örneğin: plastik kıvama göre ve %100 PÇ ile hazırlanan kontrol numunesi ($S/B = 0.53$) 25 cm yükseklikten 5 ardışık çarpma uygulaması sonunda PCH 3.41'den 1.24 düşerken %20 FeSi katkılı betonda 6 ardışık çarpma uygulaması sonunda PGH 4.32'den 1.81'e, %20 SiFeCr katkılı beton ise 6 ardışık çarpma uygulaması sonunda PGH 4.29'dan 1.71'e düşmüştür. BKM ile S/B oranı 0.40 olan ve %100 PÇ ile hazırlanan kontrol betonu 6 ardışık çarpma uygulaması sonunda PGH 4.06'dan 1.25'e, %20 FeSi katkılı betonda 8 ardışık çarpma uygulaması sonunda PGH 5.14'den 1.65'e, %20 SiFeCr katkılı beton ise 8 ardışık çarpma uygulaması sonunda PGH 5.04'den 1.40'a düşmüştür.

- Kontrol betonuna kıyasla FeSi ve SiFeCr katkılı betonlar $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 gibi zararlı kimyasallara karşı dayanıklılık açısından iyi sonuçlar vermektedir. Betonlarda $SD/Ç$ oranı arttıkça bu dayanıklılık konusunda daha iyi sonuçlar vermektedir. Bütün beton karışımlarında $MgSO_4$ çözeltisinin yıpratıcı etkisi Na_2SO_4 'e göre daha yüksektir.

- Araştırma kapsamına alınan karışım betonlarında en yüksek boşluk (% 17.13) ve su emme oranı (%9.35) K betonunda oluşmuştur. SD 'nin kullanılması ile betonların boşluk ve su emme oranlarında düşüş gözlenmektedir. Bu olay SD 'nin beton içerisindeki büyük boşlukları tıkaması ve daha yoğun yapılı betonların oluşmasına neden olması şeklinde açıklanabilir.

Sonuç olarak, Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Silis Dumanlarının taze ve sertleşmiş hamur, harç ve beton özelliklerine olan etkileri kısaca şöyledir:

Araştırılan Özellik	Olumlu	Olumsuz
TOZ, HAMUR ve HARÇLARDA		
Priz Başlama ve Sonu		✓
Kıvam		✓
Karma Suyu İhtiyacı		✓
Hacim Sabitliği	✓	
İncelik	✓	
Basınç Dayanımı	✓	
Eğilmede Çekme Dayanımı	✓	
Boy Değişimi (Na_2SO_4)	✓	
TAZE ve SERTLEŞMİŞ BETONLARDA		
Kıvam		✓
Karma Suyu İhtiyacı		✓
Birim Ağırlık	✓	
Basınç Dayanımı	✓	
Donma-Çözülme Dayanımı	✓	
Aşınma Kaybı	✓	
Çarpma Dayanımı	✓	
Kuruma Rötresi	✓	
Şişme	✓	
Zararlı Kim.Day. (Na_2SO_4 , MgSO_4)	✓	
Su Emme	✓	
Boşluk Oranı	✓	

SD katkılı betonlar; basınç, eğilmede çekme, donma-çözülme, aşınma, rötire, şişme, çarpma ve zararlı kimyasal olaylarına karşı yüksek dayanıklılık gerektiren;

- Havameydanı,
- Liman,
- Karayolu,
- Merdiven ve hazır merdiven basamakları,
- Döşeme ve plakları,
- Temel ve perde duvarı,
- Açık su kanalları,

- Baraj,
- Köprü ayakları,
- Geleneksel ve prefabrik yapı elemanları,
- Köprü yaklaşım dolguları kaplaması,
- Demiryolu sanat yapıları,
- Kimya endüstrisi yapıları,
- Yüksek titreşimli endüstriyel yapılar,
- Kanalizasyon ve drenaj künkleri,
- Beton ve betonarme borular,
- Ön ve art germeli beton ve betonarme direkler,
- Kentsel mobilya elemanları vb.

inşaatlarda kullanılabilir.

Gelişmekte olan ülkemizde kömüre dayalı termik santraller, demir-çelik, bakır, ferrokrom, gübre, kağıt vb. endüstri alanlarından elde edilen önemli miktarlarda ve tiplerde toz, kül, curuf gibi atık malzemeler ortaya çıkmaktadır. Bu endüstriyel atıkların, inşaat sektöründe değerlendirilmesi ile sınırlı doğal kaynakların hızlı tüketimi önlenebileceği gibi atıkların neden olduğu çevre sorunlarının da bir ölçüde çözümleneceğine işaretidir.

Günümüzde, bilgisayar, otomotiv vb. sektörlerin çok hızlı gelişmeler kaydettiği, hatta bazılarının çağı aşma hazırlıkları içinde olduğu bir dönemde, bir endüstriyel atık olan silis dumanlarının inşaat sektöründe değerlendirilmesiyle beton özelliklerinin geliştirilmesi konusu yeni boyutlar kazanacaktır.

Bu açıdan, Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi silis dumanlarının beton üretiminde değerlendirilmesine ilişkin mevcut durum şöyle belirlenmiştir:

- Ülkemizde, silis dumanlarının beton üretiminde kullanılması konusunda araştırma ve incelemeler oldukça sınırlıdır.

- Silis dumanının beton üretiminde kullanılması konusunda bina yapımcıları, teknik elamanlar bu önemli atık maddeyi iyi tanımamaktadır.

- Elazığ ili Kovancılar İlçesi'nde mevcut Etibank Şark Kromları İşletmesi baca tozları halen tutulmamaktadır.

- Yeterli bilgiye sahip üst düzey teknik eleman ve özellikle yeterli sayıda yetişmiş ara insangücü bulunmadığından, yüksek nitelikli beton üretilmemektedir.

Silis dumanlarının inşaat sektöründe kullanım oranının artması ve böylece nitelikli betonların üretilmesi için; yukarıda verilen mevcut durum saptaması göz önüne alınarak, aşağıda sıralanan alanlarda karşılaşılan sorunlar çözüme kavuşturulmalıdır.

Silis dumanlarının inşaat sektöründe ciddi ve tutarlı bir yaklaşımla değerlendirilmesi konusunda çözüm bekleyen sorunlar şunlardır:

- Tanıtım,
- Eğitim,
- Bilgi iletişimi,
- Üst düzey teknik eleman,
- Ara insangücü,
- Standard belirleme,
- Performans belirleme,
- Birim fiyat sistemidir.

KAYNAKLAR

ACI COMMITTEE 226., (1987). Silica Fume in Concrete. **ACI Materials Journal**. 84, March-April, 158-166.

AITCIN, P-C., ve NEVILLE, A., (1993). High-Performance Concrete Demystified. **Concrete International**. January, 21-26.

AKMAN, M.S., (1987). **Yapı Malzemeleri**. İstanbul: İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası.

AKTUNA, M., (?). **Çimento Mühendisleri İçin El Kitabı**. Ankara: Şafak Matbaası.

AL-AMOUDI, O.S.B., RASHEEDUZZAFAR, S., ABDULJAUWAD, S.N., ve MASLEHUDDIN, M., (1992). Effect of Chloride-Sulphate Ions Reinforcement Corrosion and Sulphate Deterioration in Blended Cements. **ACI SP-132**. 2, 1105-1123.

ALBAYRAK, H.K., (1985). **Beton Deneyleri El Kitabı**. Ankara: DSİ Genel Müdürlüğü. DSİ Basım ve Foto-Film İşletmesi Müdürlüğü Matbaası.

ALFES, C., (1992). Modulus of Elasticity and Drying Shrinkage of High Strength Concrete Containing Silica Fume. **ACI SP-132**. 2, 1651-1671.

ASTM C666-89, (1993). Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. Printed in Easton, MD, USA.

ASTM C490-93a, (1993). Standard Practice for Use of Apparatus for The Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. Printed in Easton, MD, USA.

ASTM C341-89, (1993). Standard Test Method for Length Change of Drilled or Sawed Specimens of Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. Printed in Easton, MD, USA.

ASTM C150-92, (1993). Specification for Portland Cement. Printed in Easton, MD, USA.

ASTM C310-89, (1993). The Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. Printed in Easton, MD, USA.

ASTM C1012-92, (1993). Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. Printed in Easton, MD, USA.

ATLASSI, E., (1992). Some Moisture Properties of Silica Fume Mortar. **ACI SP-132**. 2, 903-919.

BAALBAKI, M. SARKER, S.L., AITCIN, P.C., ve ISABELLE, H., (1992). Properties and Microstructure of High Performance Concretes Containing Silica Fume, Slag and Fly Ash. **ACI SP-132**. 2, 921-942.

BALAGURU, P., UKADILE, M., ve NAWY, N., (1987). Freeze-Thaw Resistance of Polymer Modified Concrete. **ACI SP-100**. 1, 863-876.

- BERKE, N.S. DALLAIRE, M.P., ve HICKS, M.C., (1992). Plastic, Mechanical, Corrosion, and Chemical Resistance Properties of Silica Fume (Microsilica) Concretes. **ACI SP-132. 2**, 1125-1149.
- BEREBE, M.A., ve DUCHENSE, J., (1992). Evaluation of Testing Methods Used for Assessing the Effectiveness of Mineral Admixtures in Suppressing Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction. **ACI SP-132. 1**, 549-575.
- BURGE, T.A., (1983). High Strength Lightweight Concrete with Condensed Silica Fume. **ACI SP-79. 1**, 731-745.
- CARETTE G.G., ve MALHOTRA, V.M., (1992). Long-Term Strength Development of Silica Fume Concrete. **ACI SP-132. 2**, 1017-1044.
- COHEN, M.D., ve BENTUR, A., (1988). Durability of Portland Cement Silica Fume Pastes in Magnesium Sulfate and Sodium Sulphate Solutions. **ACI Materials Journal. 85**, 148-157.
- COLIN, L., ve MENASHI, D.C., (1992). Effects of Silica Fume on Expansion Characteristics of Expansive Cement Pastes. **ACI Materials Journal. 89, 5**, 481-490.
- CONG, X., GOND, S., DARWIN, D., ve McCABE, S.L., (1992). Role of Silica Fume in Compressive Strength of Cement Paste, Mortar, and Concrete. **ACI Materials Journal. 89, 4**, 375-387.
- CORDON, W.A., (1979). **Properties, Evaluation and Control of Engineering Materials**. New York: McGraw-Hill, Inc.

- DÜNDAR, C. ve KIRAL, E., (1986). Perdeli Karkas Yapıların Yatay Yük ve Deprem Hesabı (**Yapı Mekaniğinde Son Gelişmeler**). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, ss:1-54.
- GEIKER, M., ve THAULOW, N., (1992). Mitigating Effect of Pozzolans on Alkali Silica Reactions. **ACI SP-132. 1**, 533-548.
- GROJV, O.E., (1983). Durability of Concrete Containing Condensed Silica Fume. **ACI SP-79. 1**, 695-708.
- GOLDMAN, A., ve BENTUR, A., (1989). Bond Effects in High Strength Silica Fume Concretes. **ACI Materials Journal. 440-447.**
- HELMUT, R., (1974). Properties of Fresh Pastes. **Cem. Res. Progr. 93-132.**
- HELMUT, R., (1975). Properties of Hardened Pastes. **Cem. Res. Progr. 97-130.**
- HELMUT, R., (1976). Properties of Fresh Pastes. Durability of Hardened Pastes. **Cem. Res. Progr., 159-183.**
- HERTZ, K.D., (1992). Danish Investigations Fume Concretes at Elevated Temperatures. **ACI Materials Journal. 89, 4, 345-347.**
- HOLLAND, T.C., KRYSA, A., LUTHET, M.D., ve LIU, T.C., (1986). Use of Silica-Fume Concrete to Repair Abrasion-Erosion Damage in the Kinzua Dam Stilling Basin. **ACI SP-91. 2, 841-863.**

- HOOTON, R.D., (1993). Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attack, Freezing and Thawing and Alkali-Silica Reactivity. **ACI Materials Journal**. 90, 2, 143-151.
- JAHREN, P., (1983). Use of Silica Fume in Concrete. **ACI SP-79**. 1, 625-642.
- JOHNSTON, C.D., (1992). Durability of High Early Strength Silica Fume Concretes Subjected to Accelerated and Normal Curing. **ACI SP-132**. 2, 1167-1187.
- JUSTNES, H., MELAND, I., BJOERGUM, J.O., ve KRANE, J., (1990). A ^{29}Si MAS NMR Study of the Pozzolanic Activity of Condensed Silica Fume and the Hydration of Di and Tricalcium Silicates. **Advanced in Cement Research**. 3, 11, 111-116.
- KAKIZAKI, M., EDAHIRO, H., TOCHIGI, T., ve NIKI, T., (1992). Effect of Mixing Method on Mechanical Properties and Pore Structure of Ultra High-Strength Concrete. **ACI SP-132**. 2, 997-1015.
- KALOUSEK, G.L., PORTER, L.C., ve HARBOE, M.E., (1972). Past, Present and Potential Developments of Sulfate Resisting Concretes. **Journal Test. Eval.**, 4(5), 347-354.
- KANDA, T., SAKURAMOTO, F., ve SUZUKI, K., (1992). Compressive Strength of Silica Fume Concrete at Higher Temperatures. **ACI SP-132**. 2, 1089-1103.

KAWAMURA, M., TAKEMOTO, K., ve HASABA, S., (1987).

Effectiveness of Various Silica Fumes in Preventing Alkali-Silica Expansion. **ACI SP-100**. 2, 1809-1819.

KHAYAT, K.H., ve AITCIN, P.C., (1992). Silica Fume in Concrete-An Overview. **ACI SP-132**. 2, 835-872.

KOCATAŞKIN, F., (1984). **Betonun Donmaya Dayanımı**, (DSİ: Beton Semineri . 6-10 Şubat 1984. Bildiriler Kitabı). Ankara: DSİ Basım ve Foto-Film İşletmesi Müdürlüğü, 185-191.

KONDO, R., SATAKE. M., ve USHIYAMA. H., (1974). Diffusion of Various Ions in Hardened Portland Cement. **Rev. 28Th. Gen. Meeting Cem. Assoc. Japan**, 41-43.

LAAMANEN, P.H., JOHANSEN, K., KYLTVEIT, B.P., ve SELLEVOLD, E.L., (1992). Heat Curing of Concrete with and without Condensed Silica Fume-Effect of Early Temperature History on Compressive Strength. **ACI SP-132**. 2, 1045-1059.

LARBI, J.A., ve BIJEN, J.M., (1992). Effect of Mineral Admixtures on the Cement Paste-Aggregate Interface. **ACI SP-132**. 1, 655-669.

MADEJ, J., (1992). Corrosion Resistance of Normal and Silica Fume-Modified Mortars Made from Different Types of Cement. **ACI SP-132**. 2, 1189-1207.

MALHOTRA, V.M., CARETTE, G.G., ve SIVASUNDARAM, V., (1991). Role of Silica Fume in Concrete: A Review. **Symposium on Advanced in Concere Technology**, Athens, Greece, May 11.13.1992.

MALHOTRA, V.M., (1993). Fly Ash, Slag, Silica Fume and Rice-Husk Ash in Concrete-A Review. **Concrete International**. 15, 4, 23-28.

MANGAT, P.S. ve EL-J-KHATIB, J.M., (1992). Influence of Initial Curing on Pore Structure and Porosity of Blended Cement Concretes. **ACI SP-132**. 1, 813-833.

MARCHAND, J., PIGEON, M., BOISVERT, J. ISABELLE, H.L. ve HOUDUSSE, O., (1992). Deicer Salt Scaling Resistance of Roller Compacted Pavements Containing Fly Ash and Silica Fume. **ACI SP-132**. 1. pp: 151-178.

MELAND, I., (1983). Influence of Condensed Silica Fume and Fly Ash on the Heat Evaluation in Cement Pastes. **ACI SP-79**. Vol: 1, 665-676.

MELOLEEPSZY, J. ve DEJA, J., (1992). The Effect of Variable Curing Conditions on the Properties of Mortars with Silica Fume. **ACI SP-132**. 2, 1075-1087.

MORGAN, D.R. ve WOLSIEFER, Sr.J., (1992). Wet-Mix Silica Fume Shotcrete: Effect of Silica Fume Form. **ACI SP-132**. 2, 1251-1271.

NADU. M., (1974). On the Sulfate Resistance of the Hardened Cement Paste. **Proc. VI ICC**. Sect.II.

NEIVELLE, A.M., (1977). **Properties of Concrete**. London: Pitman Publishing Co.

ÖZTURAN, T., (1993). Uluslararası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Curüf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi (Endüstriyel Katı Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu: 18-19 Kasım 1993). **Bildiriler Kitabı**. 57-78.

ÖZDEMİR, B., (1973). **Çimento Teknolojisi**. Türkiye Çimento Sanayii T.A.Ş. Yayını.

ÖZYILDIRIM, C., (1992). Concrete Bridge Deck Overlays Containing Silica Fume. **ACI SP-132**. 2, 1287-1302.

PIEGON, M., PERRATON, D., ve PLEAU, R., (1987). Scaling Tests of Silica Fume Concrete and the Critical Spacing Factor Concept. **ACI SP-100**. 2, 1155-1182.

PHILIPOSE, K.E., BEAUDOIN, J.J. ve FELDMAN, R.F., (1992). Degradation of Normal Portland and Slag Cement Concrete under Load Due to Reinforcement Corrosion. **ACI SP-132**. 2, 1491-1508.

POSTACIOĞLU, B., (1966), **Yapı Malzemesi Esasları: Cisimlerin Genel Özellikleri**. İstanbul: Teknik Üniversite Matbaası.

POSTACIOĞLU, B., (1986). **Beton: Bağlayıcı Maddeler** (Cilt: I). İstanbul: Matbaa Teknisyenleri Basımevi.

POSTACIOĞLU, B., (1987). **Beton: Agregalar, Beton** (Cilt: II). İstanbul: Matbaa Teknisyenleri Basımevi.

- RASHEEDUZZAFAR, S., AL-SAADOUN, S.S., ve AL-GAITANI, A.S., (1992). Reinforcement Corrosion-Resisting Characteristics of Silica-Fume Blended-Cement, Concrete. **ACI Materials Journal**. 89, 4, 337-344.
- READING, T.J., (1975). Combating Sulfate Attack in Corps of Engineering Concrete Construction. **ACI SP-47**. 343-366.
- ROBERTS-SEYMOUR, M., (1987). The Effect of High Range Water Reducing Admixtures on Some Durability Parameters of Silica Fume Portland Cement Concretes. **ACI SP-100**. 1, 577-585.
- SANDVICK, M., ve GJORV, O.V., (1992). Prediction of Strength Development for Silica Fume Concrete. **ACI SP-132**. 2, 987-996.
- SCHRAMLI, W., (1978). An Attempt to Assess Beneficial and Detrimental Effects of Aluminate in the Cement on Concrete Performance. Part I. **World Cement Technology**. No: 2, 35-42.
- SCHRAMLI, W., (1979). An Attempt to Assess Beneficial and Detrimental Effects of Aluminate in the Cement on Concrete Performance. Part II. **World Cement Technology**. No: 3, 75-80.
- SCOCCIA, G., VOLPE, R., ve MEDICI, F., (1987). Influence of the Silica Fume Addition on the Release of Toxic Elements from Cementitious Matrices. **Il Cemento**. 3, 131- 140.

SELLEVOLD, E.J., ve RADJ, F.F., (1983). Condensed Silica Fume (Microsilica) in Concrete: Water Demand and Strength Development. **ACI SP-132**. 1, 677-694.

SMADI, M., (1987). Shrinkage and Creep of High-Medium and Low-Strength Concretes. Including Overloads. **ACI Materials Journal**. 84, 3, 224-234.

SOMAYAGI, S., (1995). **Civil Engineering Materials**. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

SUGITA, S., SHOYA, M., ve TOKUDA, H., (1992). Evaluation of Pozzolan Activity of Rice Husk Ash. **ACI SP-132**. 1, 495-512.

SUNGUR, İ., (1986). Boşluklu Perdelerin Yatay Yüklere Göre Hesabı (**Yapı Mekaniğinde Son Gelişmeler**). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, ss:107-124.

TAZAWA, E., YONEKURA, A., KAWAI, K., KOHATA, H., ve TERAMOTO, H., (1992). Properties of Mortar Containing Ultra-Fine Fly Ash Particles. **ACI SP-132**. 1, 79-95.

TORII, K., ve KAWAMURA, M., (1994). Effects of Fly Ash and Silica Fume on Resistance of Mortar to Sulfuric Acid and Sulfate Attack. **Cement and Concrete Research**. 24, 2, 361-370.

TÜRK STANDARDLARI, (1975). **TS 25 Tras**. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1975). **TS 639 Uçucu Küller**. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1977). **TS 2871 Taze Beton Kıvam Deneyi (Çökme Hunisi Metodu İle)**. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1977). **TS 2848 Kargir Duvar Harçları**. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1978). **TS 2941 Taze Betonda Birim Ağırlık, Verim ve Hava Miktarının Ağırlık Yöntemi İle Tayini**. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1978). **TS 3068 Laboratuvarda Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı**. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1979). **TS 3322 Çimento Harcı ve Beton Numunelerinde Boy Değişim Tayini**. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1979). **TS 3323 Beton Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması, Hızlandırılmış Kürü ve Basınç Dayanım Deneyi**. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1980). **TS 706 Beton Agregaları**. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1980). **TS 707 Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi**. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

- TÜRK STANDARDLARI, (1980). **TS 3526 Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini.** Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- TÜRK STANDARDLARI, (1980). **TS 3523 Beton Agregalarının Yüzey Nemi Oranının Tayini.** Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- TÜRK STANDARDLARI, (1980). **TS 3529 Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini.** Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- TÜRK STANDARDLARI, (1980). **TS 3449 Çabuk Donma ve Çözülme Koşulları Altında Betonda Dayanıklılık Faktörü Tayini.** Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- TÜRK STANDARDLARI, (1981). **TS 3453 Beton Elemanlarda Büzülme Oranı (Rötire) Tayin Metodu.** Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- TÜRK STANDARDLARI, (1981). **TS 3624 Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu.** Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- TÜRK STANDARDLARI, (1981). **TS 3455 Betonda Geçirgenlik Katsayısı Tayin Metodu.** Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- TÜRK STANDARDLARI, (1981). **TS 699 Tabii Yapı Taşları-Muayene ve Deney Metodları.** Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1981). **TS 3694 Beton Agregalarında Aşınmaya Dayanıklılık Aşınma Oranı Tayin Metodu.**
Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1985). **TS 19 Portland Çimentoları.**
Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1985). **TS 24 Çimentoların Fiziki ve Mekanik Deney Metodları.** Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1985). **TS 687 Çimentonun Kimyevi Analiz Metodları.** Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1989). **TS 2824 Beton Parke Taşları.**
Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

TÜRK STANDARDLARI, (1990). **TS 3114 Beton Basınç Mukavemeti Deney Metodu.** Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

USHIYAMA, H., ve GOTO, S., (1975). Diffusion of Various Ions in Hardened Portland Cement Paste. **Proc. VI. ICC. Sec. II.**

USHIYAMA, H., IWAKURA, H., ve FUKUNAGA, T., (1976). Diffusion of Sulfate Ion Hardened Portland Cement. Rev. 30th. **Gen. Meeting Cem. Assoc. Japan.** 47-49.

UYSAI, M., (1993). Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi'nde Baca Tozlarının Tutulması. Antalya.

VENNESLAND, O., ve GROJV, O.E., (1983). Silica Concrete-Protection Against Corrosion of Embedded Steel. **ACI SP-79**. 1, 719-729.

YEĞİNOBALI, M.A., (1992). **Yapı Malzemesi Seçim ve Denetimi**. (F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı Doktora Ders Notları). Elazığ: F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı.

YEĞİNOBALI, M.A., (1993). Silis Dumanının Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. (Endüstriyel Katı Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu: 18-19 Kasım 1993) **Bildiriler Kitabı**. Ankara: Bizim Büro, 149-167.

YODA, A., GOSHOKUBO, K., ve NAKAGAWA, O., (1976). Effect of Salt Water on Portland Blast-Furnace Slag Cement Used in Concrete. Rev. 30th. **Gen. Meeting Cement Assoc. Japan**. 243-244.

YOGENDRAN, V., (1987). Silica Fume in High Strength Concrete. **ACI Materials Journal**. 84, 2, 124-129.

YOGENDRAN, V., LANGAN, B.W., ve WARD, M.A., (1991). Hydration of Cement and Silica Fume Paste. **Cement and Concrete Research**. 21, 691-708.

YOGENDRAN, V., LANGAN, B.W., HAQUE, M.N., ve WARD, M.A., (1987). Silica Fume in High-Strength Concrete. **ACI Materials Journal**. March-April, 124-129.