

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTOLU
ÜRÜNLERİN OTOJEN RÖTRE ÖZELİKLERİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2006

**YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTOLU
ÜRÜNLERİN OTOJEN RÖTRE ÖZELİKLERİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ
(501002107)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Şubat 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Haziran 2006**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mehmet UYAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Halit Yaşa ERSOY (M.S.Ü.)
Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü.)
Doç.Dr. Yılmaz AKKAYA (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Altı yıllık emeğin sonunda ortaya çıkan ve akademik hayatımın en önemli kilometre taşı olan bu çalışma sırasında geçen süreç bilimsel zorlukların, olumsuzlukların daha fazlası ile mücadele edebilmeyi bana öğretti. Bu zorlu zamanlarda her zaman yanımda olan, dürüstlük ve şeffaflığın iyi bir bilim adamının en önemli faziletleri olduğunu onlarda gördüğüm, hocalarım Prof. Dr. Mehmet Uyan ve Prof. Dr. M.Süheyl Akman'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Tez çalışmamla ilgili bana zaman ayıran ve sorularıma sabırla cevap veren Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'ndaki diğer hocalarıma teşekkür ederim. Fotogrametrik ölçümleri ve değerlendirmelerini yapan Araş. Gör. Ferruh Yılmaztürk'e, Prof Dr. Sıtkı Kulur'a Deneysel çalışmalarım ve tez yazımı sırasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli arkadaşım Dr. Hakan Nuri Atahan'a ve deneyler sırasında yardımlarını esirgemeyen tüm Yapı Malzemesi Laboratuvar çalışanlarına teşekkür ederim.

Bu çalışmaya verdikleri destekten ötürü Lafarge Çimento Teknik Pazarlama Müdürü Aytaç Dıgış ve Teknik Hizmetler Sorumlusu Ömer Bağdatlı'ya, Akçansa Çimento ve Nuh Çimento çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Bugüne kadar bana maddi manevi hiçbir desteğini esirgemeyen annem Necmiye Pekmezci, babam Ahmet Pekmezci, kardeşim İstem Pekmezci ve bu çalışmayı yaptığım zaman içinde kaybettiğim babaannem Vesile Pekmezci'ye, bu zorlu dönemimde hayatla arama köprüler kurarak beni hayata bağlayan Yüksek Mimar Işıl Polat'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma İ.T.Ü. Rektörlüğü Araştırma Fon Saymanlığı tarafından maddi olarak desteklenmiştir.

Şubat 2006

Bekir Yılmaz Pekmezci

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	2
2. GENEL BİLGİLER, YAYIN VE ARAŞTIRMALAR	3
2.1 Otojen Rötrenin Tanımı ve Açıklanması	3
2.2 Yüksek Perfromanslı Betonların (YPB) Çimento Hamurlarında Hidratasyon Kinetiği, Süresi ve Şekli	8
2.1 Otojen Rötire Üzerine Etki Eden Faktörler	12
2.3.1 Çimento Özellikleri	12
2.3.2 Mineral Katkılar	15
2.3.3 Kimyasal Katkılar	16
2.3.4 Ortam Sıcaklığı	16
2.4 Betonda Otojen Rötire	17
2.4.1 Agregaların Etkisi	17
2.4.2 Lif Kullanımı	17
2.5 Otojen Rötire Ölçüm Yöntemleri	18
2.6 Literatür Üzerinde Özet Değerlendirme	21
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	24
3.1 Kullanılan Malzemeler	24
3.1.1 Agregalar	24
3.1.2 Çimentolar	25
3.1.3 Kimyasal Katkılar	27
3.2 Deneyler İçin Üretilen Numunelerin Bileşimleri	27
3.2.1 Çimento Hamuru	27
3.2.2 Beton	27
3.2.3 Harç	27
3.3 Karıştırma, Yerleştirme ve Kür Koşulları	28
3.4 Uygulanan Deneyler	29
3.4.1 Priz, Yayılma (işlenebilme) ve Mekanik Deneyler	31
3.4.1.1 Priz Deneyleri	31
3.4.1.2 Yayılma Deneyleri	31
3.4.1.3 Mekanik Deneyler	32
3.4.2 Otojen Rötire Deneyleri	33
3.4.2.1 Fizikokimyasal Otojen Rötire (FKOR) Deneyleri	33

3.4.2.2 Kimyasal Otojen Rötre (KOR) Deneyleri	35
3.4.3 Hidratasyon Deneyleri	36
3.4.3.1 Hidratasyon Isısı Deneyleri	36
3.4.3.2 Hidratasyon Derecesi Deneyleri	38
3.4.4 Civalı Porozimetre (MIP) Deneyleri	40
3.4.5 Fotogrametrik Ölçümler	42
4. DENEY SONUÇLARI	44
4.1 Malzeme Deneyleri, Karışım Oranları ve Yardımcı Deneyler	44
4.1.1 Çimento Deneyleri	44
4.1.2 Agrega Karışımları	46
4.1.3 Karışımlar	48
4.1.3.1 Hamur	48
4.1.3.2 Betonların Bileşimleri	48
4.1.3.3 Harçların Bileşimleri	49
4.1.4 Priz Deneyleri Sonuçları	50
4.1.5 İşlenebilme Deneyleri Sonuçları	50
4.1.5 Mekanik Dayanım Deneyleri	51
4.2 Hidratasyon Deneyleri	52
4.2.1 Hidratasyon Derecesi Deneyleri	53
4.2.2 Hidratasyon Isısı Deneyleri	53
4.3 Civalı Porozimetre ile Mikroboşluk Deneyleri	55
4.4 Otojen Rötre Deneyleri Sonuçları	58
4.4.1 Erken Yaş Tam İzole (Tİ) Ortamda Hacimsel Fiziko-kimyasal Otojen Rötre (FKOR) Deney Sonuçları	58
4.4.2 Kimyasal Otojen Rötre (KOR) Deneyi Sonuçları	59
4.4.3 İleri Yaş Lineer Otojen Rötre Ölçümleri	60
4.4.3.1 Deformetre ile Lineer Deney Sonuçları	48
4.5 Fotogrametrik Yöntemle Ölçülen Otojen Rötre Değerleri	65
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	68
5.1 Hamurlar Üzerindeki Kısa Süreli Otojen Rötre Deneyleri	69
5.2 Hidratasyon Deneyleri, FKOR ve KOR ile İlişkileri	76
5.2.1 Hidratasyon Isısı Deneyleri	76
5.2.2 Hidratasyon Dereceleri Deney Sonuçları, FKOR ve KOR ile İlişkileri	85
5.3 Mikroporozite Deneyleri	88
5.4 Çimento Hamuru, Harç ve Betonlarda Uzun Süreli Lineer Otojen Rötre Deneyleri	95
5.5 Çimento Bileşenlerinin Otojen Rötre Oluşumuna Etkileri ve Etkinlik Düzeyleri	101
5.6 Fotogrametrik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	112
5.6.1 Fotogrametri ile Sonuçların Elde Edilmesi	112
5.6.2 Fotogrametri İle Elde Edilen Deney Sonuçlarının Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması	114
5.6.2.1 Lineer Ölçümlerin Karşılaştırılması	114
5.6.2.2 Hacimsel Ölçümlerin Karşılaştırılması	116
5.6.3 Lineer ve Hacimsel FKOR İlişkisi	117
6. GENEL SONUÇLAR	121
KAYNAKLAR	128

EK A	137
EK B	143
EK C	165
ÖZGEÇMİŞ	170

KISALTMALAR

EEF	: Eksen Etki Faktörü
FKOR	: Fizikokimyasal Otojen Rötire
JCI	: Japan Concrete Institute
HD	: Hidratasyon Derecesi
HI	: Hidratasyon Isısı
Hİ	: Havadan İzole
SA	: Süperakışkanlaştırıcı
KOR	: Kimyasal Otojen Rötire
MD	: Mikrodeformasyon (μD)
MIP	: Mercury Intrusion Porosimetry
OR	: Otojen Rötire
S/Ç	: Su/Çimento
SEM	: Scanning Electron Microscope
Tİ	: Tam İzole
YPB	: Yüksek Performanslı Beton
C1B	: C1 çimentosu ile üretilmiş SA içermeyen beton numune
C2B	: C2 çimentosu ile üretilmiş SA içermeyen beton numune
C3B	: C3 çimentosu ile üretilmiş SA içermeyen beton numune
C1HÇ	: C1 çimentosu ile üretilmiş SA içermeyen harç numune
C2HÇ	: C2 çimentosu ile üretilmiş SA içermeyen harç numune
C3HÇ	: C3 çimentosu ile üretilmiş SA içermeyen harç numune
C1SAHÇ	: C1 çimentosu ile üretilmiş SA içeren harç numune
C2SAHÇ	: C2 çimentosu ile üretilmiş SA içeren harç numune
C3SAHÇ	: C3 çimentosu ile üretilmiş SA içeren harç numune
C1SAB	: C1 çimentosu ile üretilmiş SA içeren beton numune
C2SAB	: C2 çimentosu ile üretilmiş SA içeren beton numune
C3SAB	: C3 çimentosu ile üretilmiş SA içeren beton numune
C1HM	: C1 çimentosu ile üretilmiş SA içermeyen hamur numune
C2HM	: C2 çimentosu ile üretilmiş SA içermeyen hamur numune
C3HM	: C3 çimentosu ile üretilmiş SA içermeyen hamur numune
C1SAHM	: C1 çimentosu ile üretilmiş SA içeren hamur numune
C2SAHM	: C2 çimentosu ile üretilmiş SA içeren hamur numune
C3SAHM	: C3 çimentosu ile üretilmiş SA içeren hamur numune

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u> <u>No</u>
Tablo 3.1 : Agregaların özgül ağırlıkları.....	24
Tablo 3.2 : Agregaların granulometrik bileşimleri.....	25
Tablo 3.3 : Çimentoların kimyasal özellikleri.....	26
Tablo 3.4 : Çimentoların fiziksel özellikleri.....	26
Tablo 3.5 : Çimentoların mekanik özellikleri.....	26
Tablo 4.1 : Çimentolardaki alkali miktarları (%).....	44
Tablo 4.2 : Çimento tane boyut dağılımı.....	45
Tablo 4.3 : Beton ve harç agregalarının granulometrik bileşimleri.....	47
Tablo 4.4 : Üretilen betonların teorik bileşimleri.....	49
Tablo 4.5 : Betonların gerçek bileşimleri	49
Tablo 4.6 : Harçların gerçek bileşimleri	50
Tablo 4.7 : Hamurların priz süreleri.....	50
Tablo 4.8 : Hamur, harç ve betonların yayılma değerleri.....	51
Tablo 4.9 : Erken yaş izole saklanmış hamur numune basınç deneyi sonuçları.....	51
Tablo 4.10 : Eğilme deneyi sonuçları (1 yıl).....	52
Tablo 4.11 : Basınç deneyi sonuçları (1 yıl).....	52
Tablo 4.12 : Hidratasyon dereceleri (%).....	53
Tablo 4.13 : Çimento hamuru hidratasyonu sırasında salınan toplam hidratasyon ısısı (kJ/kg).....	54
Tablo 4.14 : 28. Gün sonunda ölçülen hidratasyon ısıları.....	54
Tablo 4.15 : 28 günlük tam izole şartlarda (Tİ) saklanmış hamur numunelerde yapılan civalı porozimetre deneyleri (özet).....	56
Tablo 4.16 : 24 saat tam izole şartlarda (Tİ) saklanmış hamur numunelerde yapılan civalı porozimetre deneyleri (özet).....	57
Tablo 4.17 : 24 saat su altında havadan izole şartlarda (Hİ) saklanmış hamur numunelerde yapılan civalı porozimetre deney sonuçları özet).....	58
Tablo 4.18 : Tam izole (Tİ) ortamda saklanan hamur numunelerde ölçülen rötre sonuçları (mm^3/m^3 , %)......	59
Tablo 4.19 : Hİ koşulunda ölçülen kimyasal otojen rötre deneyi sonuçları (mm^3/m^3 , %)......	60
Tablo 4.20 : Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içermeyen hamurların lineer otojen rötre değerleri ($\mu\text{m}/\text{m}$, 10^{-6})......	61
Tablo 4.21 : Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içeren hamurların lineer otojen rötre değerleri ($\mu\text{m}/\text{m}$, 10^{-6})......	62
Tablo 4.22 : Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içermeyen betonların lineer otojen rötre değerleri ($\mu\text{m}/\text{m}$, 10^{-6})......	63
Tablo 4.23 : Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içeren betonların lineer otojen rötre değerleri ($\mu\text{m}/\text{m}$, 10^{-6})......	63

Tablo 4.24	: Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içermeyen harçların lineer otojen rötre değerleri ($\mu\text{m}/\text{m}$, 10^{-6}).....	64
Tablo 4.25	: Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içeren harçların lineer otojen rötre değerleri ($\mu\text{m}/\text{m}$, 10^{-6}).....	64
Tablo 4.26	: S/Ç oranları 0.25 olan SA içermeyen çimento hamuru numune üzerindeki noktaların fotogrametrik ölçümle belirlenmiş koordinatları.....	65
Tablo 4.27	: 0,20 S/Ç oranlı ve tam izole ortamda tutulan hamurlar için deformetre ve fotogrametrik yöntemle elde edilen lineer otojen rötre değerleri.....	66
Tablo 4.28	: 0,25 S/Ç oranlı ve tam izole ortamda tutulan hamurlar için deformetre ve fotogrametrik yöntemle elde edilen lineer otojen rötre değerleri.....	66
Tablo 4.29	: 0,30 S/Ç oranlı ve tam izole ortamda tutulan hamurlar için deformetre ve fotogrametrik yöntemle elde edilen lineer otojen rötre değerleri.....	67
Tablo 5.1	: Rötre eğrisi kritik noktaları.....	81
Tablo 5.2	: Hamurların erken yaşlarda hidrasyon dereceleri	83
Tablo 5.3	: Birim zamanda salınan ısı grafiği kritik noktaları.....	83
Tablo 5.4	: Zaman aşamalarında gözlenen hidrasyon derecelerindeki artışlar (%).....	85
Tablo 5.5	: Tİ koşulunda 24 saat saklanan çimento hamurlarındaki D_{kritik} değerleri ve toplam boşluk hacimleri.....	91
Tablo 5.6	: Hİ koşulunda 24 saat saklanan çimento hamurlarındaki D_{kritik} değerleri ve toplam boşluk hacimleri.....	91
Tablo 5.7	: Tİ koşulunda 28 gün saklanan çimento hamurlarındaki D_{kritik} değerleri ve toplam boşluk hacimleri.....	92
Tablo 5.8	: 40 nm'den ince kılcal boşluk hacimleri ve toplam mikroporoziteye oranları.....	93
Tablo 5.9	: 24 saat sonunda FKOR ile 40 nm den ince boşluk hacmi/toplam mikroboşluk hacmi oranı değerleri.....	94
Tablo 5.10	: Hamur otojen rötreleri ile harç ve beton otojen rötrelerinin karşılaştırılmaları, oranları.....	97
Tablo 5.11	: Hamur numunelerde zamanın fonksiyonu olarak oluşan, lineer otojen rötre değerleri ve maksimum rötreye oranları.....	97
Tablo 5.12	: Harç numunelerde zamanın fonksiyonu olarak oluşan, lineer otojen rötre değerleri ve maksimum rötreye oranları.....	98
Tablo 5.13	: Beton numunelerde zamanın fonksiyonu olarak oluşan, lineer otojen rötre değerleri ve maksimum rötreye oranları.....	98
Tablo 5.14	: Standard su içinde ve Tİ koşullarında saklanan hamur, harç ve beton numunelerin 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması.	101
Tablo 5.15	: FKOR oluşmasında etkin olan çimento bileşenleri (100 g çimentoda) ve oransal etkinlikleri.....	103
Tablo 5.16	: Hidrasyon Isıları (HI) yönünden oransal etkinlikler.....	105
Tablo 5.17	: Hidrasyon dereceleri (HD) yönünden oransal etkinlikler.....	106

Tablo 5.18	: Zamanla salınan hidrasyon ısı enerjinlerinin masimum değerleri ve başlangıca olan uzaklıklarının çimento türüne bağlı değişimleri.	107
Tablo 5.19	: Tİ ve Hİ koşullarında saklanan çimento hamurlarındaki mikroporozitenin nicelik ve nitelikleri-kritik boşluk çapları.....	108
Tablo 5.20	: Tİ ve Hİ koşullarında saklanan çimento hamurlarında oluşan rötrelerin oransal etkinlikleri.....	110
Tablo 5.21	: Tİ koşulunda uzun süre saklanan prizmatik çimento hamur numunelerinin otojen rötreleri ve çimentolara göre oransal etkinlikleri.....	111
Tablo 5.22	: 0,20 su/çimento oranlı hamurda eksen etki faktörleri.....	118
Tablo 5.23	: 0,25 su/çimento oranlı hamurda eksen etki faktörleri.....	119
Tablo 5.24	: 0,30 su/çimento oranlı hamurda eksen etki faktörleri.....	119
Tablo A.1	: Tam izole (Tİ) ortamda saklanan hamur numunelerde ölçülen rötre sonuçları (mm ³ /g-çimento).....	138
Tablo A.2	: Hİ koşulunda ölçülen kimyasal otojen rötre deneyi sonuçları (mm ³ /g-çimento).....	138
Tablo B.1	: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içeren C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	144
Tablo B.2	: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içeren C2 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	145
Tablo B.3	: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içeren C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	146
Tablo B.4	: Havadan izole (Hİ) koşullarda su içinde 24 saat saklanmış SA içeren C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	148
Tablo B.5	: Havadan izole (Hİ) koşullarda su içinde 24 saat saklanmış SA içeren C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	149
Tablo B.6	: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içeren C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	151
Tablo B.7	: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içeren C2 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	152
Tablo B.8	: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içeren C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	153
Tablo B.9	: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içermeyen C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	155
Tablo B.10	: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içermeyen C2 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	156
Tablo B.11	: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içermeyen C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	157
Tablo B.12	: Havadan izole (Hİ) koşullarda su içinde 24 saat saklanmış SA içermeyen C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	159
Tablo B.13	: Havadan izole (Hİ) koşullarda su içinde 24 saat saklanmış SA içermeyen C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	160
Tablo B.14	: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içermeyen C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	162

Tablo B.15	: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içermeyen C2 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	163
Tablo B.16	: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içermeyen C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.....	164

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Hidrate olan çimento hamuru kesiti.....	5
Şekil 2.2 : Hidratasyon süresince Portland çimentosu hidrate fazlarının oluşumunun şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.3 : LVDT ile lineer otojen rötre ölçüm sistemi.....	19
Şekil 2.4 : Komparatör ile lineer otojen rötre ölçüm sistemi.....	19
Şekil 2.5 : Strain gauge ile lineer otojen rötre ölçüm sistemi.....	20
Şekil 2.6 : Lazer ile lineer otojen rötre ölçüm sistemi.....	20
Şekil 2.7 : Dilatometre ile lineer otojen rötre ölçüm sistemi.....	20
Şekil 3.1 : Hamur numuneler üzerinde uygulanan deneyler.....	30
Şekil 3.2 : Harç ve beton numuneler üzerinde uygulanan deneyler.....	30
Şekil 3.3 : Otomatik vicat aleti.....	31
Şekil 3.4 : Kantro mini slump konisi detayları.....	32
Şekil 3.5 : Hacimsel otojen rötre ölçüm sistemi.....	34
Şekil 3.6 : Lineer otojen rötre ölçüm sistemi ve kalıp boyutları (mm)	35
Şekil 3.7 : Çimento hamurunda salıverilen hidratasyon ısısı deney sistemi.....	37
Şekil 3.8 : ASTM C186-98 Hidratasyon ısısı ölçüm kalorimetrisi.....	38
Şekil 3.9 : Civalı porozimetre deneyi detayları.....	41
Şekil 3.10 : Poremaster 33 GT civalı porozimetre.....	41
Şekil 3.11 : Örnek dijital fotogrametrik sistem.....	42
Şekil 3.12 : Dijital fotogrametrik sistem için kullanılan numune ve kalibrasyon alanı.....	43
Şekil 4.1 : Çimentoların semi-logaritmik ölçekle granulometri eğrileri...	45
Şekil 4.2 : Çimentoların 10µm'den büyük boyutlu kısmının normal ölçekle çizilen granulometri eğrileri.	46
Şekil 4.3 : Betonda kullanılan agrega karışımının granülometrisi.....	47
Şekil 4.4 : Harçta kullanılan agrega karışımının granülometrisi.....	48
Şekil 4.5 : Hedef noktaların numune üzerindeki yerleşimleri.....	66
Şekil 5.1 : SA içermeyen C1 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	71
Şekil 5.2 : SA içermeyen C2 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	71
Şekil 5.3 : SA içermeyen C3 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	72
Şekil 5.4 : SA içeren C1 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	72
Şekil 5.5 : SA içeren C2 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	73
Şekil 5.6 : SA içeren C3 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	73
Şekil 5.7 : SA içeren çimento hamurlarında FKOR gelişimi.....	74
Şekil 5.8 : SA içermeyen çimento hamurlarında FKOR gelişimi.....	74
Şekil 5.9 : Nawa ya ait deney sonuçları.....	75
Şekil 5.10 : C1 çimentosu toplam hidratasyon ısısı.....	77
Şekil 5.11 : C1 çimentosu birim zamanda salınan hidratasyon ısısı.....	77
Şekil 5.12 : C2 çimentosu toplam hidratasyon ısısı.....	78

	Sayfa No
Şekil 5.13 : C2 çimentosu birim zamanda salınan hidrasyon ısısı.....	78
Şekil 5.14 : C3 çimentosu toplam hidrasyon ısısı.....	79
Şekil 5.15 : C3 çimentosu birim zamanda salınan hidrasyon ısısı.....	79
Şekil 5.15 : FKOR oluşumu.....	82
Şekil 5.16 : SA içeren 0,20 S/Ç oranlı C1 çimentosu hamurunda FKOR ve birim zamanda salınan ısı.....	83
Şekil 5.17 : SA içeren 0,20 S/Ç oranlı C2 çimentosu hamurunda FKOR ve birim zamanda salınan ısı.....	84
Şekil 5.18 : SA içeren 0,20 S/Ç oranlı C3 çimentosu hamurunda FKOR ve birim zamanda salınan ısı.....	84
Şekil 5.19 : Tİ koşulunda saklanmış SA içermeyen hamurların hidrasyon dereceleri.....	86
Şekil 5.20 : Tİ koşulunda saklanmış SA içeren hamurların hidrasyon dereceleri.....	86
Şekil 5.21 : Kolinearite modeli ve referans sistemleri.....	113
Şekil 5.22 : Fotogrametrik yöntem ile elde edilmiş lineer FKOR değerleri.....	115
Şekil 5.23 : Deformetre ve fotogrametri ile elde edilen FKOR değerleri karşılaştırılması.....	115
Şekil 5.24 : Arşimet terazisi ve fotogrametri ile elde edilen hacimsel FKOR değerlerinin karşılaştırılması.....	117
Şekil A.1 : SA içermeyen C1 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	139
Şekil A.2 : SA içermeyen C2 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	139
Şekil A.3 : SA içermeyen C3 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	140
Şekil A.4 : SA içeren C1 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	140
Şekil A.5 : SA içeren C2 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	141
Şekil A.6 : SA içeren C3 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi.....	141
Şekil B.1 : S/Ç=0,20 olan SA içeren çimento hamurlarının Tİ koşulunda 24 saat sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, dV/d(dogD)-boşluk çapı grafikleri.....	143
Şekil B.2 : S/Ç=0,20 olan SA içeren çimento hamurlarının Hİ koşulunda 24 saat sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, dV/d(dogD)-boşluk çapı grafikleri.....	147
Şekil B.3 : S/Ç=0,20 olan SA içeren çimento hamurlarının Tİ koşulunda 28 gün sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, dV/d(dogD)-boşluk çapı grafikleri.....	150
Şekil B.4 : S/Ç=0,25 olan SA içermeyen çimento hamurlarının Tİ koşulunda 24 saat sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, dV/d(dogD)-boşluk çapı grafikleri.....	154
Şekil B.5 : S/Ç=0,25 olan SA içermeyen çimento hamurlarının Hİ koşulunda 24 saat sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, dV/d(dogD)-boşluk çapı grafikleri.....	158
Şekil B.6 : S/Ç=0,25 olan SA içermeyen çimento hamurlarının Tİ koşulunda 28 gün sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, dV/d(dogD)-boşluk çapı grafikleri.....	161
Şekil C.1 : Tİ Koşullarında saklanan çimento hamurlarının uzun süreli lineer otojen rötre değerleri.....	166

Şekil C.2	: Tİ koşulunda saklanan ve S/Ç oranları 0,25-0,26 olan hamur, harç ve betonların uzun süreli lineer otojen rötrelerinin karşılaştırılması.....	167
Şekil C.3	: Tİ koşulunda saklanan ve S/Ç oranları 0,41-0,42 olan harç ve betonların uzun süreli lineer otojen rötrelerinin karşılaştırılması.....	168
Şekil C.4	: Tİ koşulunda saklanan ve S/Ç oranları 0,25 ve 0,26 olan harç ve betonların uzun süreli lineer otojen rötrelerinin karşılaştırılması.....	169

SEMBOL LİSTESİ

c	: Kamera sabiti
D	: Boşluk çapı
D_{kritik}	: Kritik boşluk çapı
ϵ_{beton}	: Betondaki şekil değiştirme
ϵ_{hamur}	: Hamurdaki şekil değiştirme
$\epsilon_{\text{harç}}$	: Harçtaki şekil değiştirme
HD	: Hidratasyon derecesi.
n	: Pickett formülü katsayısı
μ	: Mikron
μD	: Mikrodeformasyon
r_{ij}	:Görüntü ve nesne uzayı koordinat sistemi arasındaki ortagonal dönüşüm matrisinin bileşenleri
V	: Nüfuz eden civa hacmi
W_n	: Buharlaşamayan su miktarı
W_k	: hidrate çimentonun 105 °C lik etüvden çıktıktan sonraki kuru ağırlığı
W_{hi}	: hidrate çimentonun kızdırma işlemi sonundaki ağırlığı
W_i	: hidrate olmamış çimentonun kızdırma kaybının oransal ifadesi.
x ve y	: P noktasının görüntü koordinatları
X, Y, Z	: Nokta koordinat sistemi cisim koordinatları (P)
x_0 ve y_0	: Başlıca noktanın (PP) imaj koordinatları
X_0, Y_0, Z_0	: Projeksiyon merkezinin koordinatları

YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTOLU ÜRÜNLERİN OTOJEN RÖTRE ÖZELİKLERİ

ÖZET

Yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonların üretimiyle, otojen rötre kavramı büyük bir önem kazanmıştır. Çimento miktarı yüksek, su/çimento oranı çok düşük seviyelerde olan bu betonlarda yeterince su bulunmamasından dolayı otojen rötrenin salt kimyasal faktör dışında kendiliğinden kurumanın yol açtığı bir fiziksel etkiyle de arttığı gözlenmiştir. Otojen rötrenin yüksek performanslı betonlarda, kuruma rötresi mertebesine erişmesiyle konu ilgi çekmeye başlamış ve konu üzerindeki araştırmalar yoğunlaşmıştır. Çimentoların çeşitli bileşenlerinin, kimyasal ve mineral katkıların bu rötre üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çok sayıda araştırma mevcuttur. Portland çimentolarının minör bileşenleri olan alkalilerin, çok düşük miktarlarına karşın betonların işlenebilme, dayanım, dürabilite ve rötre özelliklerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Yüksek performanslı betonların üretimi ile önem kazanan otojen rötre üzerinde de çözünen alkali miktarlarının etkisi olacağı kesindir, çünkü bu bileşenler Portland çimentolarının hidrasyon sürecini önemli derecede etkilemektedirler.

Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı, yüksek performanslı betonların kaçınılmaz bir bileşenidir. Bu katkıların su/çimento oranını düşürmenin dışında hidrasyon ürünlerinin morfolojisi üzerinde ve hidrasyon hızı üzerinde etkileri vardır.

Bu deneysel çalışmada yüksek performanslı betonların otojen rötreleri üzerinde çimento bileşenlerinin (özellikle çözünen alkali içeriğinin) ve süperakışkanlaştırıcı katkının etkileri araştırılmış, bu iki faktörün hidrasyon süreci üzerindeki etkileri üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca otojen rötre tanımı üzerinde tartışmalar yapılmış ve fizikokimyasal etkilerle ortaya çıkan otojen rötrenin adı fizikokimyasal otojen rötre olarak benimsenmiştir.

Çalışmada değişik kimyasal bileşenlere sahip çimentolar kullanılarak hamur harç ve beton numuneler üretilmiş, bu numunelerin otojen rötreleri belirlenmiştir. Bu çimentoların hidrasyon aşamaları da çeşitli yöntemlerle takip edilmiştir. Sonuç olarak çimento bileşenlerinin (özellikle çözünen alkali içeriğinin) ve süperakışkanlaştırıcı kullanımının otojen rötre üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Otojen rötre çimento hidrasyonunun çok erken yaşlarında büyük kısmını tamamladığından ölçümlere çok erken yaşlarda (priz başlangıcı veya daha önce) başlamak gerekmektedir. Bu gereksinime numunelere temas olmaksızın ölçümler yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu deneysel çalışma kapsamında ayrıca otojen rötre ölçümü için numuneye temas etmeden ölçüm imkanı sağlayan yeni bir ölçüm yöntemi (fotogrametrik yöntem) denenmiştir. Fotogrametrik yöntem ile elde edilen sonuçlar geleneksel yöntem ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda ana hatlarıyla şöyle sıralanabilir: Fizikokimyasal otojen rötre düşük su/çimento oranlı ve süperakışkanlaştırıcı içeren hamurlarda üç ana aşamada oluşmaktadır. Bu aşamalar süperakışkanlaştırıcı içermeyen numunelerde genelde gözlenmemektedir, ancak süperakışkanlaştırıcı kullanılmadığı durumda da bazı çimentolarda bu aşamalar ortaya çıkmaktadır. Düşük su/çimento oranlı numunelerde daha düşük hidrasyon

ısısı ve hidrasyon derecesi değerleri elde edilmesine rağmen bu hamurların fizikokimyasal rötreleri daha yüksek değerler almıştır. Fizikokimyasal rötre büyüklüğünü etkileyen asıl etkenin hidrasyonun hızını gösteren birim zamanda salıverilen ısısı değerleri olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerin yüksek olduğu çimento hamurlarında fizikokimyasal otojen rötre değerleri de daha yüksek değerler almıştır. Çimento hamuru, harç ve beton numunelerde uzun süreli rötre deneyi sonuçlarına göre rötrenin çok büyük bir kısmı ilk iki gün içinde ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, uzun süreli otojen rötre deney sonuçları kuruma rötresi için geçerli olduğu bilinen Picket formülünü sağlamaktadır. Yapılan mikroboşluk deneyi sonuçlarına göre kılcal boşlukların tüm boşluklara oranının artması fizikokimyasal rötre miktarının artmasına sebep olmaktadır. Yeni bir ölçüm tekniği olarak denenen fotogrametrik yöntemle elde edilen lineer rötre sonuçlarının geleneksel yöntem olan deformetre ile elde edilen lineer rötre sonuçlarıyla birebir örtüştüğü saptanmıştır ve bu yöntem yeni bir ölçüm tekniği olarak önerilmiştir. Fotogrametrik yöntem kullanılarak üç boyutta ortaya çıkan deformasyonlar ayrı ayrı elde edilmiş, bunun sonucunda çok erken yaşlarda düşey eksenlerdeki, deformasyonların etkin olduğu, zaman ilerledikçe yatay eksenlerdeki deformasyonların da etkin hale geçtikleri belirlenmiştir. Fizikokimyasal otojen rötre büyüklüğü üzerinde çözünen alkali oranlarının etkin olduğu, çözünen alkali miktarları daha yüksek olan çimentoların daha yüksek fizikokimyasal otojen rötre gösterdikleri belirlenmiştir. Ancak çözünen alkali miktarlarının yanında C_3A , C_4AF içerikleri ve SO_3^- /Çözünen alkali oranı'nın da etkin parametreler olduğu ve dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

AUTOGENOUS SHRINKAGE PROPERTIES OF HIGH PERFORMANCE CEMENT BASED PRODUCTS

SUMMARY

Autogenous shrinkage concept has started to gain more importance since the high performance-high strength concretes were began to utilize as structural purposes. These concretes are generally designed with high cementitious materials contents and low water to cementitious material ratios. It is observed that, due to lack of water in capillary pores in these concretes, autogenous shrinkage increases under the effects of not only the chemical factors but also the physical effects. Autogenous shrinkage has started to draw attention with having the same magnitude of drying shrinkage, and the research dealing with this concept has been intensified. There are many of researches available focusing on the effects of various components of cements, chemical and mineral admixtures on this shrinkage. It is well known that, alkalis, which are the minor components of Portland cements, affect the workability, strength, durability, and shrinkage properties of concretes drastically despite their low percentage in cement. These components also affect the hydration process of Portland cement crucially. Therefore, it is inevitable that the soluble alkalis existing in cement will have an effect on the autogenous shrinkage which became more important due to its use in the production of high performance concretes (HPC).

Superplasticizers are indispensable ingredients of HPCs. Besides reducing the water to cement ratio, these admixtures also affect the hydration rate and morphology of the hydration products. In this experimental study; effects of cement components (especially soluble alkali content) and superplasticizers on the autogenous shrinkage were investigated. The effects of these two factors on the hydration process were also focused on. Moreover, discussions were done on the definition of autogenous shrinkage. "Physicochemical Autogenous Shrinkage" term was attributed as to define this shrinkage which is mainly caused by physicochemical effects.

Cement paste, mortar and concrete specimens were produced using cements having different chemical compositions. Autogenous shrinkages of these specimens were obtained. Hydration stages of these specimens were monitored by means of various measuring techniques. As a result, the effects of cement components (especially soluble alkali content) and superplasticizers on the autogenous shrinkage of HPC's were determined.

Since the autogenous shrinkage reaches its ultimate value at very early ages, measurements of autogenous shrinkage should be conducted during this period of time (at or before initial setting time). This necessity requires an experimental technique which does not include any apparatus touching on the specimen at fresh state. A new measurement technique (photogrammetry) which is a non-touching measuring technique has also been tried in the frame of this experimental study. Results of the conventional technique and photogrammetry were compared and evaluated.

The main results obtained from this experimental study can be drawn as following:

Physicochemical autogenous shrinkage has three main phases for the pastes with low water to cement ratios containing superplasticizer. Generally, these stages were not observed for the specimens which do not contain superplasticizer. However, as an exceptional case, some specimens which do not include superplasticizer could show similar steps as the specimens having superplasticizer.

Although, lower hydration heats and hydration degrees were obtained for the lower water to cement ratio specimens, higher values of physicochemical autogenous shrinkage were measured. It was determined that the most effective factor in gaining the physicochemical shrinkage was the released heat values which show the rate of hydration. Higher physicochemical autogenous shrinkage values are measured for the cement pastes which have the higher values of released heat.

The biggest portion of the autogenous shrinkage occurs during the first two days according to long term shrinkage test results. Moreover, long term shrinkage test results confirm the Picket equation which is valid for drying shrinkage.

Microporosity test results have shown that the increasing ratio of capillary pores to total pores causes to increase in physicochemical autogenous shrinkage.

It is also determined that the linear shrinkage results obtained from photogrammetry measuring technique overlaps with the results of conventional deformeter method. This measurement technique was suggested as a new measurement technique for autogenous shrinkage. Deformations occurred in three axes (x, y and z) were obtained individually by using photogrammetry technique. It was obtained that the vertical deformations were effective during very early ages where the horizontal deformations became more effective with time.

Soluble alkali contents were also found to be effective on the physicochemical autogenous shrinkage. Cements having higher soluble alkali contents exhibited higher physicochemical autogenous shrinkage.

It was also concluded that besides the soluble alkali contents in cement, C_3A , C_4AF contents and SO_3^- /soluble alkali ratio are effective parameters and they should be taken into consideration.

1. GİRİŞ

Beton, ülkemizde ve dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesi olma özelliğini halen korumaktadır. Betonun bu derece hayati bir malzeme olarak kabul edilmesinde en önemli etkenlerden biri; beton teknolojisindeki hızlı gelişmeler ile beton kalitesinin çok yüksek mertebelere ulaşmasıdır. Kimyasal katkıların kullanılmaya başlanmasıyla, su/çimento oranları oldukça düşük betonlar üretmek mümkün olmuş, yüksek performanslı betonlar üretilenmiştir. Günümüzde 100 N/mm²'ye kadar basınç dayanımına sahip betonlar beton santrallerinde rutin olarak üretilip yapılarda kullanılabilmektedir.

Yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonların üretimiyle, otojen rötre kavramı büyük bir önem kazanmıştır. Çimento miktarı yüksek, su/çimento oranı çok düşük seviyelerde olan bu betonlarda (0,40 dan daha az) yeterince su bulunmamasından dolayı otojen rötrenin salt kimyasal faktör dışında kendiliğinden kurumunun (self desiccation) yol açtığı bir fiziksel etkiyle de arttığı gözlenmiştir. Otojen rötrenin karakteri aslında kuruma rötresininkinden farklı bir olay değildir. İki olay da bağıl nemin düşmesiyle ortaya çıkarlar. Aralarındaki tek fark kuruma rötresinde suyun dışarıya buharlaşması, diğerinde ise içeride tüketilmesidir (**Mihashi ve Leite, 2004**). Geleneksel betonlarda kuruma rötresine göre çok küçük mertebelerde kalan otojen büzülme yüksek performanslı betonlarda kuruma rötresine eşit mertebelere ulaşmakta, (**Shah ve Weiss, 2000**), (**Weiss, 2002**), (**Sakata ve Shimomura, 2004**) hatta daha yüksek değerler alabilmektedir (**Xi ve diğ., 2003**).

Otojen rötrenin, yüksek mertebelere ulaşması yüksek performanslı betonlarda çatlama ve durabilite problemlere neden olmuş, 1997 yılında İsveç'in Lund şehrinde ve 1998 yılında Japonya'nın Hiroshima şehrinde yapılan "Betonun Otojen Rötresi" konulu uluslararası çalıştaylardan sonra, yüksek performanslı betonların otojen rötresi konusunda yapılan araştırmalar yoğunlaşmıştır. Yüksek performanslı betonların ya da bunların harç veya hamur fazlarının otojen rötrelere üzerinde etkili olan faktörleri belirlemek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bir kısım araştırmacılar genelde hidrasyon süreci ve bunun etkileri üzerinde dururken,

bazıları, çimentonun fiziksel ve kimyasal yapısının, kimyasal ve mineral katkı kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Bunun yanında, bu rötrenin ölçümü için alternatif ölçüm yöntemlerinin önerildiği araştırmalar ve otojen rötreyi azaltmaya yönelik önerilerin bulunduğu çalışmalar da vardır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Portland çimentolarının minör bileşenleri olan alkalilerin, çok düşük miktarlarına karşın betonların işlenebilme, dayanım, dürabilite ve rötire özelliklerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. YPB'ların üretimi ile önem kazanan otojen rötire üzerinde de çözünen alkali miktarlarının etkisi olacağı kesindir, çünkü bu bileşenler Portland çimentolarının hidratasyon sürecini önemli derecede etkilemektedirler **(Boivin ve diğ., 1998), (Akman, 2000b), (Pekmezci ve Akman ,2003)**.

Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı, YPB'lerin kaçınılmaz bir bileşenidir. Bu katkıların su/çimento oranını düşürmenin dışında hidratasyon ürünlerinin morfolojisi üzerinde ve hidratasyon hızı üzerinde etkileri vardır.

Bu deneysel çalışmada yüksek performanslı betonların otojen rötireleri üzerinde çimento bileşenlerinin (özellikle çözünen alkali içeriğinin) ve süperakışkanlaştırıcı katkının etkileri araştırılmış, bu iki faktörün hidratasyon süreci üzerindeki etkileri üzerine yoğunlaşmıştır.

Otojen rötire çimento hidratasyonunun çok erken yaşlarında büyük kısmını tamamladığından ölçümlere çok erken yaşlarda (priz başlangıcı veya daha önce) başlamak gerekmektedir. Bu gereksinime numunelere temas olmaksızın ölçümler yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu deneysel çalışma kapsamında ayrıca otojen rötire ölçümü için numuneye temas etmeden ölçüm imkanı sağlayan yeni bir ölçüm yöntemi (fotogrametrik yöntem) denenmiştir.

Çalışmada değişik kimyasal bileşenlere sahip çimentolar kullanılarak hamur harç ve beton numuneler üretilmiş, bu numunelerin otojen rötireleri belirlenmiştir. Bu çimentoların hidratasyon aşamaları da çeşitli yöntemlerle takip edilmiştir. Sonuç olarak çözünen alkalilerin ve süperakışkanlaştırıcı kullanımının otojen rötire üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Fotogrametrik yöntem ile elde edilen sonuçlar geleneksel yöntem ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER, YAYIN VE ARAŞTIRMALAR

Bu deneysel çalışmada yüksek performanslı betonların otojen rötreleri üzerinde çimento bileşenlerinin (özellikle çözünen alkali içeriğinin) ve süperakışkanlaştırıcı katkının etkileri araştırılmıştır. Otojen rötne deyimi üzerinde henüz belirli bir tanım geliştirilememiştir. Araştırmacıların farklı otojen rötne kavramları vardır ve bu yüzden tanımda büyük kargaşa mevcuttur. Aşağıda öncelikle otojen rötne tanımı somutlaştırılmaya çalışılmış ve araştırmacıların yaklaşımları açıklanmıştır. Daha sonra otojen rötne üzerine hidrasyon sürecinin, ürünlerinin, çimento bileşiminin, mineral ve kimyasal katkıların etkinlikleri üzerindeki yayın ve araştırmalar incelenmiştir; şimdiye kadar yürütülen otojen rötne deney sistemleri derlenmiştir. Otojen rötne deneyleri genelde bağlayıcı fazı ve harç üzerinde sürdürülmüştür. Sorunun betondaki durumuna da değinilmiştir. Bu bölümde son olarak otojen rötne üzerinde yapılan araştırma ve yayınların taraması özetlenerek sunulmuş ve bu araştırmada ele alınan konunun neden seçildiği açıklanmıştır.

2.1. Otojen Rötrenin Tanımı ve Açıklanması

Beton malzemesinin en önemli sorunlarından biri, hacim büzülmesi yani rötredir. Farklı faktörlere bağlı olarak meydana gelen rötne türleri mevcuttur. Bunlar ekolojik rötne veya kuruma rötresi (hidrolik rötne), plastik erken rötne, termik rötne, karbonatlaşma rötresi ve bünyesel rötredir (**Akman, 1990**). Kuruma rötresi bunlar arasında en çok incelenen ve etkinliği en yüksek varsayılan rötne türüdür. Bu rötreye hidrolik rötne veya ekolojik rötne adının verilmesi, ortamın sıcaklığı, rutubeti ve rüzgarının etkisiyle su kaybının meydana gelmesi sonucu oluşmasıdır.

Bünyesel rötne adını verdiğimiz rötreye son yıllarda yeterli olmamakla beraber otojen rötne adı da verilmeye başlanmıştır. Bu rötne 1900'lerde Le-Chatelier tarafından bulunmuş ve tanımlanmıştır (**Le Chatelier, 1900**). Olay, karışımdan önceki çimento mutlak hacmi ve su mutlak hacminin toplamının hidrasyondan sonra daha düşük bir hacme dönüşmesidir, çünkü suyun hidrate elemanların molekülleri içine girmesi

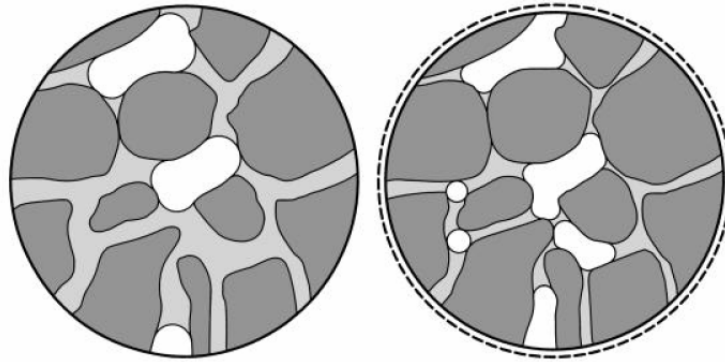
ile yani bir kimyasal reaksiyon sonucu hacimsel bir büzülme meydana gelmektedir. Bu b z lmede kuruma rötresinde rastlanan ağırlık kaybı yoktur, madde hidratasyondan önceki ağırlığını korur. Bu kimyasal değişimin dış görünen hacimde nasıl bir rötre oluşturduğu hakkında kesin bir yanıt bulunmamaktadır.

Otojen rötre konusuna büyük önem veren, hatta bu konuda standard geliştiren Japon araştırmacılar, bu rötreyi şöyle tanımlamaktadır: “Kimyasal rötre, toplam hidratasyon ürünlerinin hacimlerinin anhidr  imento ve suyun hidratasyondan önceki hacimleri toplamından daha küçük olması fenomenidir.” Bu tanımdaki iki önemli  ge, bu otojen r treinin görünen hacimdeki makroskopik büzülme olduğu ve yükleme, sıcaklık, buharlaşma gibi dış etkilerden bağımsız geliştiği hususlarıdır.

Yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonların üretimiyle, otojen rötre kavramı büyük bir önem kazanmıştır. Çimento miktarı yüksek, su/ imento oranı çok düşük seviyelerde olan bu betonlarda (0,40 dan daha az) otojen r treinin eski bünyesel rötre tanımında ele alınan salt kimyasal faktör dışında kendiliğinden kurumanın (self desiccation) yol açtığı bir fiziksel etkiyle de arttığı gözlenmiştir. Ancak bu etki yine de hidratasyonun varlığı sonunda meydana geldiğinden bunu fiziko-kimyasal bir olay olarak nitelemek daha doğrudur. Dış ortamdan tamamen izole edilen ve izotermal bir ortamda su ve çimentonun karışmasından sonra yüksek performanslı (su/ imento oranı çok düşük)  imento hamurları, hidratasyonları için gerekli olan suyu, mikro boşluklardaki i  (serbest) suyu absorbe ederek sağlamaktadırlar. Böylece kendiliğinden kuruyan  imento hamurunda kılcal mikro çaplı borulardaki su menisklerinin çapları azalarak katı çeperlere etkiyen çekme kuvvetleri artmakta, böylece makro boyutta büzülme meydana gelmektedir. Böylece otojen rötre kimyasal değişimle oluşan rötre ile, kendiliğinden oluşan kurumanın yol açtığı r treinin toplamı olmaktadır. Çalışmamızda birinci rötreye kimyasal otojen rötre (KOR) ve ikinciye fizikokimyasal otojen rötre (FKOR) adı verildi. Bazı araştırmacılar otojen rötre deyimini sadece FKOR için kullanmakta ve hatta FKOR’nin kimyasal rötre (KOR)’nin bir bölümü varsaymaktadırlar. FKOR değer olarak küçük olmakla beraber hidratasyonun başlıngı  aşamasında (ilk 24-48 saat) meydana geldiğinden yüksek performanslı beton teknolojisinde önem taşır. (JCI, 1998), (Tazawa ve Miyazawa, 1995a), (Tazawa ve Miyazawa, 1995c), (Radocea, 1998), (Barcelo ve diğ., 1999), (Park ve diğ., 1998), (Wild ve diğ., 1998), (Holt ve Levio, 1998), (Levio ve Holt, 1997).

FKOR' nin karakteri aslında kuruma rötresininkinden farklı bir olay değildir. İki olay da rölatif nemin düşmesiyle ortaya çıkarlar. Aralarındaki tek fark kuruma rötresinde suyun dışarıya buharlaşması, diğerinde ise içeride tüketilmesidir (**Mihashi ve Leite, 2004**). Geleneksel betonlarda kuruma rötresine göre çok küçük mertebelerde kalan otojen büzülme yüksek performanslı betonlarda kuruma rötresine eşit mertebelere ulaşmakta, (**Shah ve Weiss, 2000**), (**Weiss, 2002**), (**Sakata ve Shimomura, 2004**) hatta daha yüksek değerler alabilmektedir (**Xi ve diğ., 2003**).

Şekil 2.1. de hidrate olan çimento hamurunun şematik kesiti gösterilmektedir. Soldaki kesitte düşük hidratasyon dereceli çimento hamuru, sağdakinde ise hidratasyonu ilerlemiş yüksek hidratasyon dereceli çimento hamuru görülmektedir. Katı maddeler (hidratasyon ürünleri, anhidr çimento, silis dumanı vb) koyu gri ile, boşluk suyu açık gri ile ve boşluklar ise beyazla gösterilmektedir. Şekilde de açıkça görüldüğü gibi hidratasyon sürecinin gelişmesiyle birlikte boşluk suyu giderek azalmakta, bunun yanında katı madde oranı artmakta, mevcut boşluklar incelmekte ve kimyasal rötreye bağlı olarak yeni boşluklar şekillenmekte, menisklerin eğrilik yarıçapları küçülmekte ve tüm bunların sonucunda makroskobik hacimde bir büzülme meydana gelmektedir (**Jansen ve Hansen, 2001**).



Şekil 2.1: Hidrate olan çimento hamuru kesiti (**Jansen ve Hansen, 2001**)

Zamanında müdahale edilmediği durumda su/çimento oranı çok düşük olan yüksek performanslı betonlarda ortaya çıkan bu büzülmeyi önlemek mümkün değildir. Örneğin çok erken yaşlarda (priz başlangıcı gibi) betona su desteği sağlanmazsa kılcal boşluklar tıkanmakta, kılcal boşlukların sürekliliği kaybolmakta ve bu durum sonucunda menisklerdeki çekme kuvvetleri artmaktadır. Bu aşamadan sonra dışarıdan sağlanan su bu boşlukların içine girememekte ve rötreye kaçınılmaz hale gelerek erken yaşlardaki çatlaklara sebep olmaktadır. Bunun yanında eleman

boyutları çok büyük olduğunda suyun iç bölgelere ulaşması mümkün olamamakta ve otojen rötre değeri artmaktadır (JCI, 1998), (Tazawa ve diğ., 1995b), (Miyazawa ve Monteiro, 1996), (Radocea, 1998).

Yukarıda bahsedilen kendiliğinden oluşan rötre literatürde beş farklı isimle anılmaktadır ve tanımlamada büyük kargaşa bulunmaktadır. Örneğin: otojen rötre, dışsal kimyasal rötre, otojen deformasyon, izole rötre ve içsel kuruma rötresi vs. tanımları vardır. Bu görünen deformasyon her ne kadar farklı isimlerle anılsa da, bu olay için araştırmacıların en sık kullandığı terim olan otojen rötre üzerinde durmak gerekir. İngilizcede “Autogenous Shrinkage” olarak anılan otojen rötre teriminin kelimelerini etimolojik olarak incelediğimizde eski Yunanca’da autos-kendiliğinden ve genesus-meydana gelen karşılıklarına rastlarız. Yani otojen rötre terimi etimolojik açıdan kendiliğinden oluşan, meydana gelen büzülme anlamına gelmektedir. Otojen rötre konusundaki kavram ve tanım kargaşasını tartışmak, irdelemek konuya netlik kazandırmak açısından gerekli ve önemlidir. Aşağıda, bu tanımlama kargaşası farklı araştırmacıların yaklaşımları sıralanarak açıklandı.

Genel olarak dış ortamdan izole edilmiş numunede, bağlayıcı fazda meydana gelen ve yukarıda ayrıntılı olarak anlatılan makroskobik hacim azalması için otojen rötre terimi araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır (JCI, 1998), (Tazawa ve Miyazawa, 1995a), (Tazawa ve Miyazawa, 1995b), (Radocea, 1998), (Barcelo ve diğ., 1999), (Park ve diğ., 1998), (Wild ve diğ., 1998), (Holt ve Levio, 1998), (Levio ve Holt, 1997), (Turcry ve diğ., 2002), (Turcry ve Loukili, 2002), (Bjontegaard ve Sellevold, 1998), (Brooks ve diğ., 1998). Makroskobik sıfatı bu hacim büzülmesinin görünen (zahiri) hacimdeki büzülme olduğunu vurgulamak amacı taşımaktadır. Unutulmaması gereken husus, kimyasal rötre mutlak (katı) hacimde hidratasyon süresince devam eden büzülmeye yol açar, ancak hidratasyon ürünlerinin oluşturduğu ve nihai durumda yaklaşık %28 poroziteye sahip (Powers, 1964) boşluklu yapı nedeniyle ve özellikle su içinde tutulma halinde dışsal hacimde büzülme olmaz hatta genleşme dahi gözlenebilir, yani otojen rötre oluşmaz.

Japon JCI Komitesi otojen rötre konusunda çok geniş çalışmalar yapmıştır. Bu komite’ye göre göre, dış ortamla herhangi bir nem alış veriş olmayan çimento hamuru ve/veya betonda oluşan makroskobik hacim değişimine otojen hacim değişimi adı verilir. JCI komite raporuna göre otojen rötre; katı iskeletin oluşmaya başlamasıyla ortaya çıkan ve dışsal hacimde meydana gelen büzülme olarak

tanımlanmaktadır. Bu rapora göre hidratasyon reaksiyonunun sonucu olan otojen rötre, kimyasal rötrenin bir parçasıdır ve dış ortamdan izole edilen numuneler üzerinde priz başlangıcından itibaren belirlenir, priz başlangıcına kadar olan büzülme ise kimyasal rötreden ibaret varsayılır (**JCI, 1998**).

Justness ve ark. hidratasyondan dolayı ortaya çıkan boşluklar ve makroskobik hacim büzülmesinin toplamını toplam kimyasal rötre olarak tanımlarken, izole durumda makroskobik boyutta meydana gelen büzülmeyi dışsal kimyasal rötre olarak adlandırmışlar ve otojen rötre terimini kullanmaktan kaçınmışlardır (**Justnes ve diğ., 1998a**), (**Justnes ve diğ., 1998b**), (**Justnes ve diğ., 1999**), (**Justnes ve diğ., 1996**).

Boivin, Paill re ve ark. ise dolu (katı) hacimdeki büzülmeyi kimyasal rötre olarak tanımlamışlar ve bunun dışsal hacimde görünen kısmını içsel kuruma rötresi veya otojen rötre olarak adlandırmışlardır (**Boivin ve diğ.,1998**), (**Paill re ve diğ., 1989**).

Jensen, Hammer ve ark. da, izole  imento hamuru sisteminin görünen deformasyonu için, otojen deformasyon terimini kullanmayı yeğlemişlerdir (**Hammer ve Hesse, 1999**), (**Jensen ve Hensen, 1996**).

Persson ise yaptığı çalışmada diğer araştırmacıların otojen rötre olarak tanımladığı kendiliğinden kurumaya bağlı olarak oluşan ve izole koşullarda görünen hacim büzülmesi ile elde edilen rötreyi kısaca izole rötre (sealed shrinkage) olarak tanımlamıştır (**Persson, 1998**) .

Literatürdeki  alışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, dış ortamdan izole edilmiş numunede, kimyasal ve fiziko-kimyasal etkiler sebebiyle bağlayıcı fazda meydana gelen görünen hacim azalması (büzülme) için kullanılan diğer terimler de aşağıda irdelenmiştir.

Justness ve ark. ın kullandığı toplam kimyasal rötre terimi, olayın kökeni sebebiyle ayrı bir kargaşaya yol açmaktadır. Yukarıda da bahsedildiği gibi otojen rötre olayının sebebi kimyasal ve fiziko-kimyasaldır. Dolayısıyla bu rötrenin bileşenleri arasında fiziksel etkinliklere dayanan kendiliğinden kuruma rötresi de vardır ve bunu tamamen kimyasal bir sebebe dayandırmak olayın gelişimine aykırı olmaktadır. Boivin, Paill re ve ark.'ın kullanmayı tercih ettiği içsel kuruma rötresi de olayı tamamen fiziksel bir temele oturtmakta ve kimyasal bileşenini göz ardı etmektedir. Jensen, Hammer ve ark. tarafından kullanılan otojen deformasyon teriminin tanımı, **JCI (1998)** tarafından dış ortamla herhangi bir nem alış verişi olmayan  imento

hamuru ve/veya betonda oluşan makroskobik hacim değişimi olarak yapılmıştır. Yani bu deformasyon rötre veya genleşme şeklinde olabilir. Deformasyon kelimesi burada bir mühendislik büyüklüğünü yansıtamamaktadır.

Otojen rötre terimini, gerek olayın sebepleri, gerek kelimenin etimolojik yapısı düşünülerek dış ortamdan tamamen izole edilmiş ve izotermal bir ortamda saklanan numunenin bağlayıcı fazında kimyasal ve fiziko-kimyasal nedenlerle meydana gelen toplam görünen hacim büzülmesi olarak tanımlamak doğru olacaktır. Böylece otojen rötre büyüklüğü kimyasal rötrenin hacimde oluşturduğu büzülme ve içsel kuruma nedeniyle görünen hacimde meydana gelen büzülmenin toplamı olmaktadır. Bu çalışmada tanım olarak yukarıda bahsedildiği gibi kimyasal ve fiziko-kimyasal etkilerle oluşan görünen hacim büzülmesi otojen rötre deyimi ile ifade edildi.

2.2. Yüksek Performanslı Betonların (YPB) Çimento Hamurlarında Hidratasyon Kinetiği, Süresi ve Şekli

Kimyasal ve fizikokimyasal faktörlere bağlı olan otojen rötrenin hidratasyon olayından kaynakladığı yukarıda belirtildi. YPB’lerde su/çimento oranının çok düşük olması ve bunların üretiminde muhakkak surette süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılması sonucunda hidratasyon kinetiği, süresi, şekli ve hidrate ürünlerin mineralojik yapıları, morfolojileri farklılık göstermektedir. Ayrıca çimentonun kimyasal bileşimi ve özellikle minör bileşenlerin varlığı ile süperakışkanlaştırıcı türü bu farklılıklar üzerinde etken olmaktadır.

Kimyasal katkı içermeyen normal su/çimento oranıyla (>0.55) üretilen Portland çimentolu betonların çimento fazlarının hidratasyonu hala tartışılan ve tam kesinlik kazandırılmayan bir süreçtir. Doğal olarak YPB çimento fazlarında bu problem daha karmaşıktır. YPB’lerin hidratasyonlarının incelenmesi, elbette katkısız normal betonların hidratasyonlarının ele alınması ve değişikliklerin belirtilmesi ile yürütülebilir. Çok geniş bir konu olan hidratasyon süreci, **C. Vernet’nin (1995)** basitleştirilmiş özetine dayanarak aşağıda açıklanmıştır. Vernet Portland çimentosunun hidratasyonunu beş aşamada tartışmıştır.

Birinci aşama karıştırma periyodudur. Su ile temasa geçen çimento fazları sulu ortama farklı iyonları salıverirler. Bu solüsyona geçiş oldukça hızlı ve ekzotermiktir. Hızlı reaksiyon gösteren iki hidrat teşekkül eder ve tane yüzeylerini kısmen örterler.

Bunlar CSH (kalsiyum silikat hidrate) ve etrenjittir (trikalsiyum sülfo aluminat hidrate, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$).

İkinci aşama ölü bölge (uyuyan bölge, dormant period) oluşumudur. Sıvı ortamda Ca^{++} iyonlarının artışı ve pH değerinin yükselmesi klinker fazının dissolusyonunu yavaşlatır. Termal akı önemli oranda düşer, ancak tam olarak yok olmaz. Bu aşamada az miktarda CSH teşekkül eder; eğer alüminyum ve sülfat iyonları arasında denegeli bir oran varsa kısıtlı miktarda etrenjit veya çözünmeyen sert bir kalsiyum aluminat silikat hidrate olan hidrogarnet oluşabilir. Bu periyotta sulu faz Ca^{++} a doygun hale gelmekle beraber $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşması ve çökmesi yoktur. Öte yandan çimento tanelerinde flokülleşme gözlenir.

Üçüncü aşama prizın başlama sürecidir. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nin oluşması ve çökmesi hidratasyon reaksiyonlarını aktive eder. Aktivasyon, sulu fazda silikat iyonunun pratik anlamda yokluğundan kaynaklanır, Ca^{++} ve OH^- iyonlarının ani bir şekilde başlayan tüketimi Portland çimentosu komponentlerinin dissolüsyonunu hızlandırır. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nin endotermik olan çökmesi sonucu termal akı'nın yükselişi kısıtlanır.; zamanla bu yükseliş artar. İğne etrenjitlerin ve CSH'nin oluşumu prizın başlamasına yol açar. Hidrate silikat ve alüminatların partiküller arasında oluşturduğu bağlantılar, sertleşmenin giderek gelişmesine sebep olur.

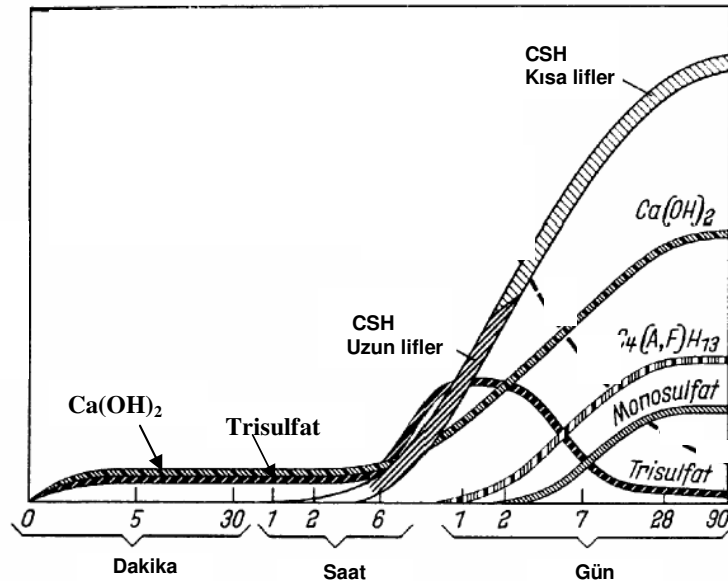
Dördüncü aşama sertleşme safhasıdır. Çimentolarda kalsiyum sülfat miktarı düşükse, sülfatlar aluminat fazıyla reaksiyona girmez; prizın başlangıcında SO_4^- iyonlarının tümü etrenjit oluşumunda tüketilmiştir. Bu olay karışımı izleyen 9~15. saatler arasında gelişir. Önceden oluşan etrenjit, artan aluminat fazıyla monosülfoaluminat meydana getirmek üzere sülfatını salıverir. Bu reaksiyonlar ısı çıkarır ve bu ısı silikatların hidratasyonuna yardımcı olur.

Bu ilk dört aşamada meydana gelen hidrate ürünler sıvı fazda oluşmuşlardır. Bunlar lifli gevşek yapılı CSH'lar, iğneli etrenjitler ve hegzagonal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandid) kristalleridir. Boşluklu, gevşek yapılı olan bu ögeler düşük dayanımlıdır ve “dışsal ürünler” (external) adını alırlar.

Beşinci aşama hidratasyonun yavaşlama devresidir. Anhidr çimento tanelerinin yüzeyi hidrat tabakaları ile örtülmüştür. Bu tabakalar giderek sıkılaşmakta ve kalınlaşmaktadır. Suyun anhidr bölgelere diffüzyonu zorlaşmakta ve böylece hidratasyon yavaşlamaktadır. Çeperlerin sıkılaşması hidrate çimento hamurunun çok

kompakt, amorf görünümlü, masif bir kütleye dönüşmesini sağlar. Bu ürünlere “içsel ürünler” adı verilmektedir. Çimentoya mekanik dayanım kazandıran da bu içsel ürünlerdir. Hidratasyon, ya anhidr fazın tükenmesi (iyi kürlenmiş, su /çimento oranı nispeten yüksek), ya suyun anhidr bölgeye erişememesi (çok yoğun ve yüksek oranda floküle sistem) veya gerekli suyun bulunamaması (çok düşük su/çimento oranlı betonlar) hallerinde sona erer.

Şekil 2.2 de, yukarıda ayrıntılarıyla beş aşamada anlatılan hidratasyon süreci özet bir grafik olarak verilmektedir. Burada 0-90 gün arasındaki hidratasyon süresince oluşan ürünlerin gelişimleri zaman ekseninde gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Hidratasyon süresince Portland çimentosu hidrate fazlarının oluşumunun şematik gösterimi (Locher ve diğ., 1976).

YPB’lerin hidratasyon kinetiği ve sürecinin farklılıklarını meydana getiren iki ana parametre vardır. Bunlar, ortama katılan süperakışkanlaştırıcıların (SA) hidrate ürün yapılarında oluşturması muhtemel değişiklikler ve bu betonlardaki su/çimento oranlarının aşırı düşüklüğüdür. Birinci parametre henüz detaylı biçimde ele alınamamıştır; esasen bu parametrenin genel bir sonuca varması da olanaksızdır; zira SA türlerinin ve çimentoların çok değişik birleşimleri çok farklı nihai ürünlerin oluşmasına neden olacaktır. Buna karşılık düşük su/çimento oranlarının etkileri nispeten basit bir perspektif içinde ele alınabilir. Bu bakımdan düşük su/çimento parametresi öncelikle tartışılmıştır.

Su/çimento oranının azaltılmasının betonun dayanımını yükseltmenin birinci koşulu olduğu herkes tarafından bilinir. Bunun ilk nedeni de boşluksuz ve iyi sıkışmış içsel ürünlerin artırılmasıdır. Hidratasyon sonucu ortaya çıkan boşlukların çapları çok küçüktür. Dışarı ile ilişkisi olmayan bu boşluklar genellikle birbirleriyle de bağımlı değildir. Bu mikroyapı otojen rötrenin fiziko-kimyasal bileşeni olan kendiliğinden kuruma (self-desiccation) olayının meydana gelmesine sebep olur. Çimento taneciklerinin birbirine daha yakın olmaları sonunda kapiler boşluk miktarı azalır ve dışsal ürün teşekkülü için gerekli boşluk bulunmaz, öte yandan su miktarı da düşük olduğundan sıvı ortamdaki iyon konsantrasyonu doygunlaşır ve çökelmeler meydana gelir, azalan iyonlar nedeniyle dışsal ürün oluşumu da kısıtlanmış olur. İçsel ürünler daha küçük ve ince yapıdadırlar ve Taramalı Elektrom Mikroskobu (SEM, Scanning Electron Microscope)'da gözlenen CSH camsı (amorf) yapıdadır. Büyük oranda hekzagonal kireç kristalleri yoktur, bu durum ileri yaşlardaki hidratasyon olasılığını ortadan kaldırır. Yüksek su/çimento oranlarındaki lifli CSH ve uzun iğneli etrenjit kristallerine rastlanmaz. Su/çimento oranının düşüklüğü hidratasyonun da kısa sürede sona ermesine yol açar. Ayrıca hidratasyon hızı da yüksektir. Düşük su/çimento oranlı, yeterli düzeyde hidrate olmuş çimento hamurlarında kılcal boşluk çapları 10~50 nm boyutundadır. Yüksek su/çimento oranlı hamurlarda ise bu çaplar 3~5 µm'a varır. Çapın 50nm'yi aşması geçirimsizlikte sorun yaratırken, çapın 50 nm'den düşük olması ise sünme ve rötne sorunlarına sebep olur ve bu rötne otojen rötne niteliğindedir (Mehta, 1986).

YPB'ların hidratasyon sürecinde ikinci parametre olarak nitelendirilen süperakışkanlaştırıcı (SA) katkının kimyasal ve mineralojik etkileri aşağıda özetlenmiştir.

SA'ların kimyasal etkisi ara fazların dissolüsyon hızlarını değiştirmek ve genellikle yavaşlatmak şeklinde ortaya çıkar. Özellikle C₃S fazında adsorplanmaları priz sürelerini geciktirme ve hidratasyon ısıları gelişimini (HI) geciktirme ile kendini gösterir (Onafrei ve Gray, 1989), (Aİtcin, 1998). SA'nın C₃A tarafından adsorplanması ise etrenjit oluşumunu bozar (Luke ve Aİtcin, 1991). İlginç bir husus SA'ların sadece çimento fazlarına adsorpsiyonu dışında klinkere katılan kalsiyum sülfatlar tarafından da adsorplanabilmeleri ve bunun sonucunda hidratasyon sürecinde değişikliklere yol açmalarıdır. Bu adsorpsiyon sıvı fazdaki sülfat konsantrasyonunu düşürmektedir, böylece SO₄²⁻, Al⁺⁺⁺, Ca⁺⁺ arasındaki denge

bozulur ve hidrogarnet oluşumuna yol açan şimşek priz meydana gelir. Çimento üretiminde normal doğal alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) yerine farklı kalsiyum sülfatlar da kullanılmaktadır. Bunların herbirinin kullanılan SA ile uyumları farklıdır. SA değiştirildiğinde önceleri tesis edilen denge adsorpsiyonun farklılığı sonucu bozulur, yalancı priz veya şimşek priz olayları ile karşılaşılır.

SA'ların hidrasyon ısı (HI) ve hidrasyon derecesi (HD) üzerindeki etkileri de önemli ve farklıdır. HI değerlerinin melamin ve naftalen sülfonatlı SA'larla %16, vinil kopolimerli SA ile %27, karboksilatlı SA ile %31 azaldığı belirtilmektedir (Yıldırım ve diğ., 2003). HD değerlerinde azalmalar ise %37, %43 ve %49 değerlerindedir. SA katılımının genelde HI ve HD değerlerini büyük ölçüde indirdikleri, ancak her katkının farklı etkidiği görülmektedir. Bu sonuçlar SA türü ve çimento türü bilinmeden bir genellemeye gitmenin yanlış olduğunu kanıtlamaktadır. Bunun yanında Yıldırım ve ark. yaptığı bu çalışmada SA katılımıyla hidrasyonun tamamlanamadığı ve hızının azaldığı gösterilmiş olmaktadır (Yıldırım ve diğ., 2003).

2.3. Otojen Rötire Üzerine Etki Eden Faktörler

Yüksek performanslı betonların ya da bunların harç veya hamur fazlarının otojen rötireleri üzerinde etkili olan faktörleri belirlemek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bir kısım araştırmacılar genelde hidrasyon süreci ve bunun etkileri üzerinde dururken, çimentonun fiziksel ve kimyasal yapısının, kimyasal ve mineral katkı kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Bazı araştırmacılar ise agrega kullanımının, kullanılan agrega türünün ve agrega konsantrasyonunun etkilerini incelemişlerdir. Bunun yanında dış ortam koşullarının ve betonda lif kullanımının otojen rötire üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalar da yapılmıştır. Aşağıda, otojen rötire üzerine etki eden faktörler sınıflandırılarak sunulmaktadır.

2.3.1. Çimento özellikleri

Otojen rötire olayı hidrasyonun bir sonucu olduğu ve çimento çimento hamuru fazında ortaya çıktığı daha önce ayrıntılı olarak açıklandı. Hidrasyon sürecini denetleyen çimento karakteristiklerinin (fiziksel ve kimyasal özelliklerin) otojen rötire üzerinde önemli etkiler göstereceği vurgulandı.

Çimentonun inceliği hidratasyon gelişiminde ve kılcal boşluk yapısı oluşumunda önemli etkinlik taşır. Bentz ve diğ. yaptıkları çalışmada, çimento taneleri boyut dağılımının, eşit su/çimento oranlı çimento hamurlarının otojen rötrelere üzerindeki etkilerini araştırmışlardır, Deneysel çalışmada ince tanecik boyutuna sahip numunelerde otojen rötrelere miktarının daha yüksek olduğunu gözlemlerken iri tanecik boyutlu çimento ile üretilen numunelerde ise erken yaşlarda rötrenin aksine bir miktar genleşme olduğunu belirlemişlerdir (**Bentz ve diğ., 2001**). İnce çimento kullanımı daha yoğun bir içyapı oluşumuna neden olmakta ve oluşan kılcal boşlukların çapları daha ince olmaktadır. İnce kılcal boşluklar da otojen rötrelere büyüklüğünün artmasına sebep olmaktadır.

Hidratasyon kinetiğini yönlendiren karma oksitlerin de çimento hamurunun otojen rötresini de etkilediği, araştırmalar sonucunda ispatlanmıştır. Birçok araştırmacı çimentonun karma oksitlerinden C_3S ve C_2S in otojen rötrelere üzerinde çok güçlü bir etkisinin olmadığını, bunun yanında C_3A ve C_4AF miktarlarının özellikle de C_3A/C_4AF oranının otojen rötrelere üzerinde önemli etkilerinin olduğunu ve otojen rötrenin bu oranın düşmesiyle azaldığını vurgulamaktadır. C_3A ve C_4AF nin etkileri C_3S ve C_2S e göre 10~20 mertebesinde olabilmektedir (**Bentz ve diğ., 2001**), (**Tazawa ve Miyazawa, 1995**), (**Miyazawa ve diğ., 2001**), (**Tazawa ve Miyazawa, 1997**). Justness ve ark. ise C_3A nın yanında C_3S in de reaktif bir faz olması nedeniyle otojen rötreyi etkilediğini ileri sürmektedirler (**Justness ve diğ., 1998**). Araştırmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde en etkili çimento bileşeninin erken hidratasyon aşamasında oldukça reaktif olan C_3A olduğu anlaşılmaktadır.

Çimentoların otojen rötrelere üzerindeki etkileri bu tezin de ana teması olduğundan daha detaylı biçimde ele alındı. Çözünen alkali problemi, hidratasyon süreci ve kinetiği üzerinde büyük değişiklikler oluşturduğundan dolayı biçimde otojen rötreyi de etkilerler. Bu nedenle sorun sadece YPB çimento hamurları ile sınırlandırılmadan incelendi.

Portland çimentolarının minör bileşenleri olan alkaliler, çok düşük miktarlarına karşın betonların işlenebilme, dayanım, dürabilite ve rötrelere özelliklerini önemli ölçüde etkilerler. Genellikle negatif yönde olan bu etkileri değişen çimento üretim teknikleri ve ekonomik zorluklar nedeniyle alkali miktarlarını indirgeyerek bertaraf etmek olanaksızdır (**Jawed ve Skalny, 1977a**), (**Jawed ve Skalny, 1977b**), (**Akman,**

2000a), (Yıldırım ve diğ., 2003). Alkali agrega reaksiyonu, priz süreçleri, reoloji, terleme, rötire-genleşme, mekanik dayanım, karbonatlaşma, çiçeklenme gibi konularda alkalilerin etkileri uzun yıllardır incelenmektedir **(Jawed ve Skalny, 1977a), (Jawed ve Skalny, 1977b), (Akman, 2000), (Yıldırım ve diğ., 2003).** YPB'ların üretimi ile önem kazanan otojen rötire üzerinde de çözünen alkali miktarlarının etkisi olacağı kesindir, çünkü bu bileşenler Portland çimentolarının hidratasyon sürecini önemli derecede etkilemektedirler **(Boivin ve diğ., 1998), (Akman, 2000b), (Pekmezci ve Akman, 2003).** Bu konuda henüz detaylı bir araştırma yürütülememiştir; sorunu aydınlatmak amacıyla bu tezin ana araştırma teması bu konuya yönlendirildi.

Çimentolar içinde bulunan ve çözünebilen alkaliler sodyum (Na) ve potasyum (K) bileşenleridir. Bunlar çoğunlukla sülfat tuzlarıdır, mamafih cüz'i miktarda alkali aluminat ve karbonatlar da mevcuttur, hatta klinker ögeleriyle birleşik karmaşık alkalın tuzlara da rastlanır.

Alkalilerin hidratasyon sürecindeki ve hızındaki etkileri C_3A 'nın hidratasyonuna tesir etmeleri ile ortaya çıkar. C_3A 'nın hızlı hidratasyonu bilindiği gibi etrenjit oluşumu ile denetlenir, bunun için de arayer sıvısında $CaSO_4$ ve $Ca(OH)_2$ 'nin varlığı gereklidir. $CaSO_4$, Ca^{++} ve SO_4^{--} iyonlarının birleşmesiyle oluşur, ancak K^+ ve Na^+ 'nın SO_4^{--} ile birleşme yetenekleri Ca^{++} 'nin yeteneğinden çok üstündür. Şu halde ortamda alkali iyon oranı yüksekse etrenjit teşekkülü için gerekli $CaSO_4$ miktarı azalacak ve çimetonun hidratasyon hızı denetlenmiyecek ve artacaktır. Ayrıca alkali oranı yüksek ortamda, çözülmüş $Ca(OH)_2$ miktarı da düşer; bu gelişim de etrenjit oluşumunu kısıtlayacaktır **(Jawed ve Skalny, 1977a), (Jawed ve Skalny, 1977b), (Spierings ve Stein, 1976), (Woermann ve diğ., 1979).** C_3A 'nın hidratasyonu denetlenebilirse alkali miktarı yüksek bile olsa son mekanik dayanımlarda düşme önlenabilir, bunun için çimento üretiminde daha yüksek oranda $CaSO_4$ kullanmak gerekir.

Alkali varlığı C_3A hidratasyonu ile birlikte C_3S ve C_2S in hidratasyonlarını da hızlandırmaktadır. Böylece ilk günlerde çimento tarafından bağlanan su miktarı fazla olmaktadır **(Jawed ve Skalny, 1977a), (Jawed ve Skalny, 1977b).** Ancak düşük su/çimento oranı ile üretilen betonlarda bu fazla suya duyulan gereksinme karşılanamadığından otojen rötreye yol açan mikroyapı oluşmaktadır. Hidratasyon hızının artması hidratasyon ısısı (HI) miktarını azaltmakta, ancak hidratasyon ısısı-

zaman diyagramında birinci tepe noktasını orijine yaklaştırarak hidratasyon derecesini (HD) de düşürmektedir (Yıldırım ve diğ., 2003). Bu olayda süperakışkanlaştırıcı türünün de önemli rolü vardır. Polikarboksilat türü SA'larda bu etkiler daha anlamlı değerlere varmaktadır.

Yüksek alkalili çimentolarda HI değerleri daha büyük yüzdelerle azalmaktadır. HD değerlerinde ise azalma düşük alkalili çimentolarda daha yüksek olmaktadır (Yıldırım ve diğ., 2003)

Çimentolardaki alkalilerin artması priz başlangıcı ve priz sonu sürelerini de kısaltmaktadır (Ono ve diğ., 1980), (Niël, 1968), (Bomble, 1980). Bu olay ve hidratasyonun hızlanması, hidrate kristal ürünlerin boyutlarını doğal olarak büyütür, ve homojen bir boyut kazanmalarını önler; gevşek ve boşluklu bir yapının meydana gelme olasılığı belirir. Çok düşük su/çimento oranıyla üretilen YPB'larda erken yaşta oluşan FKOR'nin geçirimsiz bir yapı oluşturması ve suyla kütleme imkanının kaybolması ile yüksek alkalilerin boşluklu yapı meydana getirmesi süreçleri ters yönde gelişen faktörler olmaktadır. Ancak gecikmiş su kürü nedeniyle ortaya çıkan ve pratikte gözlenen otojen rötire çatlama hasarları, içsel ürün oluşma sürecinin yüksek alkali sürecinden daha etkin olduğunu kanıtlamaktadır.

2.3.2. Mineral katkıları

Günümüzde, beton üretiminde yaygın olarak kullanılan mineral katkıları yüksek performanslı, özellikle kendiliğinden yerleşen betonların ayrılmaz bir parçası olmuştur. Mineral katkıların otojen rötire üzerindeki etkileri de çimentonun etkilerine benzer şekilde olmaktadır. Bu etkileri aynı şekilde fiziksel ve kimyasal özelliklerin etkileri olarak iki sınıfa ayırmak mümkündür. Fiziksel özelliklerden en etkin olanı mineral katkının inceliğidir. İncelik arttıkça kılcal boşluk çapları küçülmekte ve buna bağlı olarak boşluklarda oluşan gerilmeler artmaktadır. Bu da otojen rötrenin fiziksel kısmının artmasına neden olmaktadır. Bu olay yüksek inceliği sebebiyle silis dumanı ve curuf kullanımında daha belirgin gözlenmektedir. Silis dumanı gibi tanecik boyutu oldukça küçük olan mineral katkıları otojen rötreyi arttırmasına karşın yine ince yapıda olan metakaolin kullanımının, gösterdiği genişleme eğilimi nedeniyle otojen rötreyi önemli ölçüde azalttığı hatta bir hacim artışına neden olduğu da belirtilmektedir. Beton endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir mineral katkı olan uçucu külün çimento ile yerdeğiştirmesi, genellikle otojen rötreyi düşürmekle birlikte

kuruma rötresini arttırmaktadır. Tüm bunların yanında kullanılan katkının dozajının da önemli bir etken olduğu gözden kaçırılmamalıdır (Brooks ve diğ., 1998), (Koenders ve diğ., 1998), (Tazawa ve Miyazawa 1995), (Jensen ve Hansen, 1996), (Wild ve diğ., 1998), (Akkaya ve diğ., 2004), (Yang ve Zhang, 2004).

2.3.3. Kimyasal katkılar

Kimyasal katkı türlerinin etkilerini araştırırken bu katkıları kullanım amacına göre sınıflandırmak yararlı olacaktır, zira bazı kimyasal katkılar betonun hacim stabilitesi üzerinde etki yapacak şekilde tasarlanırken bazılarının kullanım amacı tamamen farklıdır.

Süperakışkanlaştırıcı katkılar betona su/imento oranını düşürmek amacıyla katılmasına karşın, bu katkıların kullanılması durumunda betonun otojen rötresinin karakteri bir miktar değişebilmektedir. Aslında SA katkıların otojen rötre büyüklüğü üzerinde belirgin bir etkisi yoktur. Ancak SA katkılar otojen rötrenin gelişimini, yani karakterini etkileyebilir. SA katkı kullanılması durumunda otojen rötrenin ivmelenme periyodunun başlangıcı gecikebilir. Bu da SA katkısının C₃S in hidratasyonunu geciktirmesinden kaynaklanmaktadır. C₃S in hidratasyonu geciktiği için otojen rötrenin ivmelenme periyodunun başlangıcı da uzamaktadır (Tazawa ve Miyazawa, 1995c), (Nawa ve Horita, 2004). Akışkanlaştırıcı katkıların yanında imento hamurunun hacim stabilitesiyle doğrudan ilgili kimyasal katkıların (rötre önleyici ve genleştirici) otojen rötre büyüklüğünü etkileyeceği muhakkaktır. Yapılan çalışmalarda genleştirici katkıların otojen rötre büyüklüğünü azalttığı ancak bunun bağlayıcı tipine ve betonda kullanılan mineral katkıların türüne de bağlı olduğu belirtilmektedir (Hori ve diğ., 1998), (Bentz ve diğ., 2001).

2.3.4. Ortam sıcaklığı

Dış ortam sıcaklığının hidratasyon süreci devam eden imento hamuru üzerindeki etkilerini ikiye ayırabiliriz. Birincisi dış ortam sıcaklığının hidratasyon sürecini yavaslatması veya hizlandırması, diğeri ise betonun genleşmesine veya büzülmesine sebep olarak hacim stabilitesi üzerinde etken olmasıdır. Dış ortam sıcaklığının otojen rötre üzerindeki etkileri ise temel olarak imento hamuru üzerinde olan bu iki etkinin süperpozisyonu olarak düşünülebilir. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına göre otojen rötre büyüklüğü dış ortam sıcaklığının artışıyla artmaktadır. Bunun en önemli sebebi hidratasyonun sıcaklığın artışıyla ivmelenmesidir. Bununla birlikte imento

türüne bağılı olarak bazı istisnai sonuçların elde edilebileceğı de söylenmektedir (Loukili ve diğ., 2000), (Jensen ve Hansen, 1999), (Lura ve diğ., 2001).

2.4. Betonda Otojen Rötire

2.4.1. Agregaların etkisi

Otojen rötire betonun hamur fazında oluşan bir olay olduğundan, agregaların katılmasıyla çimento hamurunun azalması sonucunda otojen rötrenin düşmesi beklenen bir olaydır. Burada hamur miktarının azalmasının yanında kuruma rötresinde olduğu gibi agregaların varlığının hamurun rötire deformasyonunu sınırlaması da önemli bir etkindir. Agregaların su emme kapasitesi arttıkça betonun otojen rötresindeki düşüş oranı artmaktadır. Agregaların içinde hapsolmuş su, hidratasyon sırasında kullanılmakta ve menisklerde oluşacak gerilmelerin artmasını engellemektedir. Hafif agrega kullanımının betonun otojen rötresini azaltma yönünde diğer agregalara nazaran daha üstün olduğu belirtilmektedir. Bunun nedeni hafif agregalar boşluklu yapıları sebebiyle içlerinde fazla miktarda su bulundurabilmekte ve rezervuar gibi davranarak hidratasyon sırasında depoladıkları suyu ortama salarak kendiliğinden kuruma olayını önemli miktarda engelleyebilmektedirler. Rötiredeki maksimum azalmayı elde edebilmek için kullanılan hafif agreganın suya doygun olması gerekir. Bununla birlikte yüksek performanslı betonlarda hafif agrega kullanımının dayanımlarda yüksek oranda düşüş meydana getirebilmesi gibi bir dezavantajı vardır (Tazawa ve diğ.,1995a,b,c), (Bentur ve diğ., 2001), (Koenders ve diğ., 1998), (Holt, 2005).

2.4.2. Lif kullanımı

Yapılan deneysel çalışmalarda yüksek performanslı betonlarda çelik ve diğer türlerde lif kullanıldığı durumda otojen rötire büyüklüklerinde düşüşler olduğu, kısıtlanmış otojen rötire deneyinde ilk çatlama süresinin normal betonlara nazaran daha uzun olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında lifli betonlarda otojen rötire gelişimi lifsiz betona göre daha erken sonlanarak sabit bir değere yakınsamaktadır. Lifsiz betonda büzülme devam ederken lifli betonun boyutu belirli bir aşamadan sonra sabit kalmaktadır (Paillère ve diğ., 1989), (Loukili ve diğ., 1999).

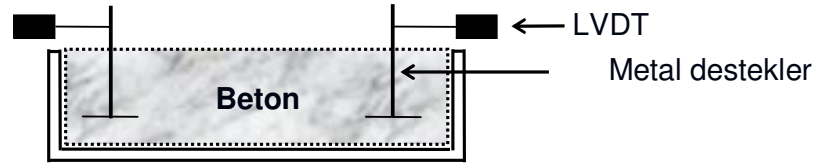
2.5. Otojen Rötire Ölçüm Yöntemleri

Otojen rötrenin önemli kısmı ilk 24 saat süresinde gelişir ve bu süre sonunda büyük kısmı sonuçlanır. Bu yüzden ölçümlerin çimento daha tam katılaşmadan, priz başlangıcı civarında ve çimento hamuru kalıptan çıkarılmadan başlaması gerekir. Bu konuda çok fazla çalışma yapılmasına karşın, ölçüm tekniği üzerine henüz geliştirilmiş bir standard bulunmamaktadır. Bununla birlikte ASTM C827 erken rötire ölçümü için bir yöntem önermektedir. Bu standardda taze beton silindirik bir kaba doldurulur ve üst yüzeyine bir çelik bilya yerleştirilir. Düşey yönde bilyanın çökmesi ölçülerek rötire deformasyonları saptanmaya çalışılır. Bu yöntem sadece düşey ölçümlerle sınırlıdır. Elde edilen şekil değiştirmelerin içine yerçekiminden dolayı ortaya çıkan oturmalar ve terleme (bleeding) de dahil olduğundan bu yöntemle otojen rötrenin belirlenmesi doğru olmaz (Holt, 2001), (ASTM, 2001), (JCI, 1998).

Araştırmacılar birçok otojen rötire ölçüm yöntemi geliştirmişler ve uygulamışlardır. Otojen rötire ölçüm yöntemleri ölçüm prensibi bakımından hacimsel ve lineer rötire olarak iki gruba ayrılır. Ölçüm sistemi hacimsel veya lineer sistemlerden hangisi olursa olsun ana prensip, numunenin dış ortamdaki nem ve havadan izolasyonunun kusursuz şekilde yapılmasıdır. Hacimsel ölçüm sistemi Arşimet prensibine dayanır. Burada dış ortamdan tamamen izole edilmiş (hava ve su izolasyonu) lateks elastik kılıf içerisine doldurulan çimento hamuru sabit sıcaklıkta su içinde tartılır. Arşimet prensibine göre suyun kaldırma kuvveti su içindeki cismin hacmiyle doğru orantılıdır. Elastik kılıf içindeki numunenin hacmi azalırken, numunenin su içindeki ağırlığı buna bağlı olarak artar. Hacimsel yöntemde numunenin su içindeki ağırlık değişimi izlenerek hacim değişimi elde edilir. Bu yöntemde çimento hamurunun hacim değişimi, karışım anından itibaren belirlenebildiğinden özellikle çimento hamuru için yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem, deneyde kullanılan kondom ile çimento hamuru birleşim arayüzeyinde terleme sonucu biriken suların tekrar geri emilmesi sebebiyle sonuçlarda hatalara sebep olabileceği nedeniyle eleştirilmektedir.

Beton ve harç numunelerinin otojen rötirelerinin belirlenmesinde genellikle lineer ölçümler tercih edilir. Lineer ölçümlerde de numunenin dış ortamdan nem izolasyonunun sağlanması gerekmektedir. Çeşitli boyutlardaki prizmatik kalıplar kullanılabilir. Bu yöntemde genellikle beton kalıp içerisindeyken ölçümlere başlanır ancak kalıp içindeki numuneler üzerinde numuneye zarar verilmeksizin ölçüme başlanabilmesi için betonun katılaşmaya başladığı zaman beklenmektedir.

Lineer ölçümler genellikle uzun süre devam eder. Beton 24 saatin sonunda kalıptan çıkarılır ve izolasyonları korunarak rötre ölçümlerine devam edilir. Şekil değiştirmeler LVDT, komparatör, strain gauge veya lazer kullanılarak elde edilebilir. Bu sistemler sırasıyla Şekil 2.3 ,2.4 ,2.5 ve 2.6 de gösterilmektedir. Lineer ölçüm sistemleri içinde taze haldeki numuneye zarar vermeksizin ölçüm olanağı veren tek sistem Şekil 2.8 de gösterilen lazer ile ölçüm sistemidir. Lineer yöntemlerin en büyük sakıncası, taze haldeki betonun, beton ile kalıp arasındaki sürtünme kuvvetini yenmeye yetecek dayanıma sahip olmamasıdır (Justness, 1998), (Barcelo ve diğ., 1999), (Holt ve Levio, 1998), (Persson, 1998), (Turcry ve diğ., 2002), (Lee ve diğ., 2003), (Tazawa ve Miyazawa, 1998), (Kohno ve diğ., 1999).

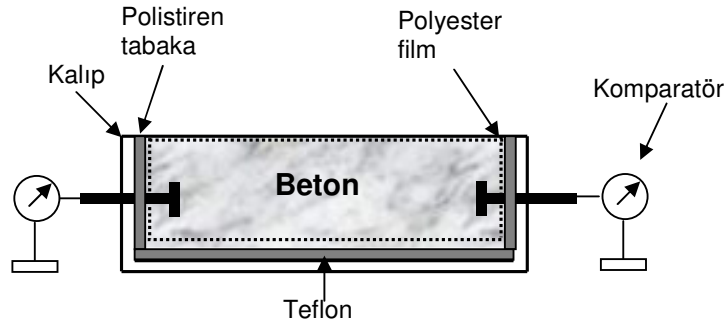


a: (Holt and Levio ,1998)

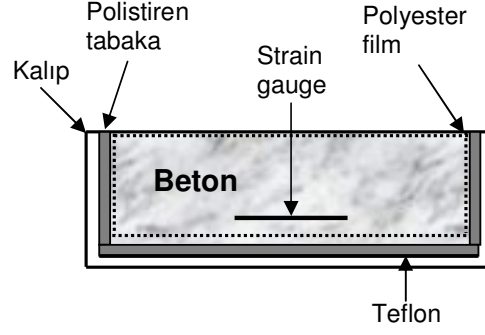


b: (Lee ve diğ., 2003)

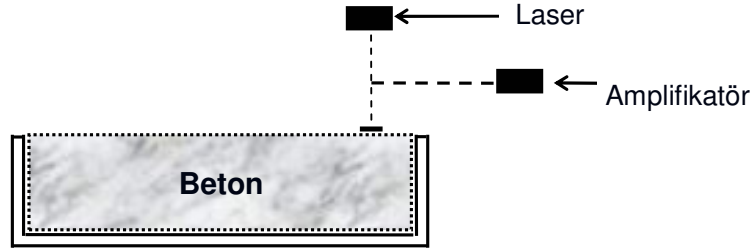
Şekil 2.3: LVDT ile lineer otojen rötre ölçüm sistemi



Şekil 2.4: Komparatör ile lineer otojen rötre ölçüm sistemi (Tazawa ve Miyazawa, 1998)

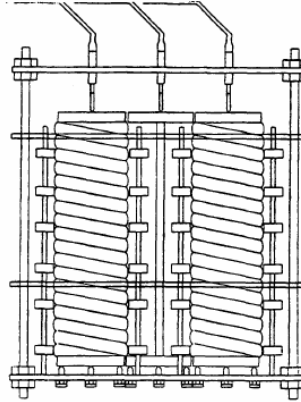


Şekil 2.5: Strain gauge ile lineer otojen rötre ölçüm sistemi (Kohno ve diğ., 1999)



Şekil 2.6: Lazer ile lineer otojen rötre ölçüm sistemi (Holt ve Levio, 1998)

Jensen ve Hensen tarafından geliştirilen ve dilatometre adı verilen bir başka sistemin lineer ve hacimsel ölçümlerin her ikisini de bir arada barındırdığı belirtilmektedir. Bu sistemde numuneler üretildikten hemen sonra helezonik plastik boruların içine doldurulur ve üretim anından itibaren boruların boyundaki değişimler elde edilir. Beton taze haldeyken hacimsel şekil değiştirmeyi ölçen sistemin beton sertleştikten sonra lineer şekil değiştirmeyi elde ettiği ileri sürülmektedir. Şekil 2.7. de verilen bu sistemde şekil değiştirmeler LVDT veya komparatör yardımıyla ölçülmektedir.



Şekil 2.7: Dilatometre ile lineer otojen rötre ölçüm sistemi (Jansen ve Hansen, 1995)

Lineer ve hacimsel yöntem sonuçlarının aralarında net bir ilişki elde edilemediği anlaşılmaktadır. Ancak hacimsel rötre ile lineer rötre arasında 3-5 gibi bir oran olduğu kabul edilebilmektedir (**Barcelo ve diğ., 1999**).

Çalışmamızda çok erken yaştaki otojen rötre değerlerini ölçebilmek amacıyla hamurlar üzerinde yapılan otojen rötre deneylerinde hacimsel sistem seçilmiştir. Lineer sistem ise uzun süre rötre deneylerinde, hamur harç ve beton için kullanılmıştır. Bir seri numunede geleneksel lineer ölçümlerle birlikte fotogrametrik yolla da ölçümler yapılmıştır.

2.6. Literatür Üzerinde Özet Değerlendirme

Dış ortamın su ve havasından tamamen izole edilmiş betonlarda, dış yükleme, sıcaklık, buharlaşma vb etkilerden kaynaklanmayan makroskopik düzeyde oluşan görünen hacim büzülmesine otojen rötre adı verilmiştir. Ancak bu rötrenin nedenlerine inildiğinde bu rötrenin ve türlerinin tanımlanmasında büyük bir karışıklık ortaya çıkmıştır.

Otojen rötrenin meydana gelmesinde asıl faktör bağlayıcı fazın hidratasyonudur. Hidratasyonun kinetiği, süreci, ısısı, derecesi üzerine etkiyen faktörler otojen rötrenin büyüklüğü ve türünün denetlerler. Bu faktörler çimentonun, daha genel olarak bağlayıcının birleşimi, inceliğidir. Birleşimde C_3A , C_4AF , SO_3 ve özellikle suda çözünen alkaliler rötre değerlerini değiştirmektedir. Bu arada mineral ve kimyasal katkıların önemli fonksiyonları olmaktadır. Otojen rötrenin öneminin ortaya çıkmasında çok düşük su/çimento (su/bağlayıcı) oranları ile üretilen yüksek performanslı betonların teknolojisi rol oynamıştır.

Otojen rötrenin hacimsel ve lineer, kısa ve uzun süreli deneyleri için pek çok yöntem geliştirilmiş, ancak hala uygun ve yeterli bir standard oluşturulamamıştır.

Yapılan literatür etüdü sonunda çalışmada izlenecek yol şöyle saptanmıştır.

1. Otojen rötrenin oluş nedenlerine dayanılarak sınıflandırılması ve böylece daha açık bir tanımlamaya varılması.
2. Otojen rötre çalışmalarının düşük su/çimento ile üretilen çimento hamurları, harçlar ve betonlar üzerinde yapılması.

3. Otojen rötre üzerine etkiyen faktörlerin rötre türleri üzerindeki etki sınıflarının belirlenmesi. Bunlar özellikle çimento bileşimindeki çözünen alkaliler, C_3A , C_4AF , SO_3 /alkali oranları, çimento inceliği ve süperakışkanlaştırıcı varlığıdır.

4. Kısa süreli deneylerin çimento hamurları üzerinde hacimsel olarak ve Arşimet Prensibine göre yürütülmesi. Uzun süreli deneylerin mikrobetonlar, harçlar ve hamurlar üzerinde lineer olarak klasik deformasyon ölçüm yöntemleri ile ve fotogrametrik sistemle yürütülmesi.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Kullanılan Malzemeler

Bu tezdeki deneysel çalışmalar temel olarak çimento hamurları üzerinde yapılmıştır. Harç ve beton numuneler üretilerek bu numuneler üzerinde de bazı deneyler yürütülmüştür.

3.1.1. Agregalar

Deneysel çalışmada iki çeşit agrega kullanılmıştır. Bunlar, Sakarya bölgesinden elde edilen silis esaslı kum ve kalker esaslı kırmataştır. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo 3.1 ve 3.2’de verilmektedir. Organik madde deney sonucunda açık sarı renk veren kumun ince madde oranı %0,7 dir.

Beton ve harç üretimlerinde kullanılan agregaların özelliklerini belirlemek amacıyla agregalar üzerinde özgül ağırlık ve elek analizi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Özgül ağırlık deneyi **TS EN 1907-6 (2002)** standardı esaslarına göre yapılmıştır. Elek analizi deneyinde ise **TS 3530 EN 933-1 (1999)** standardı esas alınmıştır.

Tablo 3.1: Agregaların özgül ağırlıkları

Agrega Cinsi	Özgül Ağırlık (kg/m ³)
Dere Kumu	2630
Kırmataş	2710

Tablo 3.2: Agregaların granulometrik bileşimleri

Elek Göz Boyutu (mm)	Elekten Geçen Malzeme (%)		
	Kırmataş	Dere Kumu	Kırmakum (*)
8	100	100	100
4	37	100	49
2	18	80	41
1	15	62	22
0.5	8	38	19
0.25	7	8	100

(*) Kırmataşın 4 mm’lik elekten elenmesi ile elde edilmiştir.

3.1.2. Çimentolar

Üretilen hamur, harç ve betonlarda TS EN 197 ye uygun çimentolar kullanılmıştır. Türkiye’de üretim yapan 7 farklı çimento fabrikasından elde edilen 8 farklı PÇ 42.5 çimento incelenmiş ve kimyasal bileşimi birbirine yakın ancak alkali oranları oldukça farklı olan 3 farklı çimento ile çalışılması uygun bulunmuştur. Deneylerde kullanılan bu üç çimento iki çimento fabrikasından temin edilmiştir. C1 ve C2 çimentoları A fabrikasının (düşük alkalili C1 ve normal alkalili C2) farklı iki üretimidir. C3 çimentosu ise B fabrikasının üretimlerinden alınmıştır.

Çimentolar üzerinde kimyasal, fiziksel ve mekanik deneyler Nuh Çimento Fabrikası ve İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır. Çimentoların kimyasal özellikleri Tablo 3.3 de, fiziksel özellikleri Tablo 3.4 de, mekanik özellikleri de Tablo 3.5 de verilmektedir.

Tablo 3.3: Çimentoların kimyasal özellikleri

Çimento	C1	C2	C3
Kimyasal bileşim (%)			
SiO ₂	20,29	19,50	18,8
Al ₂ O ₃	4,72	4,65	5,56
Fe ₂ O ₃	3,77	3,58	3,47
CaO	63,18	62,37	62,80
MgO	2,40	2,36	2,42
SO ₃	2,84	2,67	2,78
Çözünmeyen kalıntı	0,23	0,39	0,38
Kızdırma kaybı	1,05	2,63	2,52
Serbest kireç	1,26	1,81	1,31
K ₂ O (toplam)	0,73	0,89	1,18
Na ₂ O (toplam)	0,23	0,23	0,32
K ₂ O+ Na ₂ O (toplam)	0,96	1,12	1,5
Na ₂ O eşdeğeri (toplam)	0,71	0,81	1,1
K ₂ O (çözünen)	0,342	0,563	0,705
Na ₂ O (çözünen)	0,084	0,067	0,142
K ₂ O+ Na ₂ O (çözünen) (toplam)	0,426	0,630	0,847
Na ₂ O eşdeğeri (çözünen)	0,309	0,437	0,606
C ₃ S	52,67	54,37	57,05
C ₂ S	18,44	14,89	10,92
C ₃ A	6,13	6,27	8,86
C ₄ AF	11,47	10,89	10,56

Tablo 3.4: Çimentoların fiziksel özellikleri

	C1	C2	C3
Özgül Ağırlık (kg/m ³)	3100	3090	3090
90 µ Elek Üzerinde Kalan (%)	0	0	1
200 µ Elek Üzerinde Kalan (%)	0	0	0
Ortalama Boyut (µ)	13.371	14.827	16.793
Blaine Özgül Yüzey (m ² /kg)	410	380	307
Normal Kıvam Suyu (%)	30	30	29
Le Chatelier Toplam Açılma (mm)	2	2	2
Priz Başlangıcı (Saat : Dakika)	3:00	2:00	3:00
Priz Sonu (Saat : Dakika)	5:00	3.15	3:45

Tablo 3.5: Çimentoların mekanik özellikleri

		C1	C2	C3
Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	7 gün	7,4	6,7	6,6
	28 gün	7,7	7,1	7,3
Basınç Dayanımı (N/mm ²)	7 gün	35,9	33,4	32,2
	28 gün	53,2	51,2	46,4

3.1.3. Kimyasal katkılar

Çalışmada, hamur, harç ve beton numuneler iki farklı su/çimento oranıyla üretilmiştir. Düşük su/çimento oranında yeterli işlenebilmeyi sağlamak amacıyla polikarboksil etilen esaslı süperakışkanlaştırıcı (SA) katkı kullanılmıştır.

3.2. Deneyler İçin Üretilen Numunelerin Bileşimleri

Çalışmada erken yaş rötre ölçümleri için çimento hamuru ve uzun süre lineer rötre ölçümleri için çimento hamuru, harç ve beton numuneler üretilmiştir. Bunların karışım prensipleri ve oranları aşağıda verilmiştir.

3.2.1. Çimento hamuru

Üç farklı çimento ile SA katkı içeren ve içermeyen hamur numuneler üretilmiştir. SA içermeyen hamur numunelerin S/Ç oranı 0,25, çimento miktarının ağırlıkça %0,75 i oranında SA içeren hamur numunelerde S/Ç oranı 0,20 olarak seçilmiştir. Böylece erken yaş deneyleri için toplam 6 seri numune üretilmiştir.

3.2.2. Beton

Üretilen betonlarda çimento hamurlarında uygulanan karışım planına bağlı kalınarak SA içeren ve içermeyen numuneler üretilmiştir. Betonların su/çimento oranları belirlenirken sabit işlenebilme hedef alınmıştır. Katkısız betonlardaki su/çimento oranı SA içermeyen numunelerde 0,42 olarak seçilmiştir. Bu değer elde edilirken çimento hamurunun su/çimento oranına agregaların ıslatma suyu eklenmiş ve bu değere ulaşılmıştır. Bu işlem yapılırken tane boyutuna göre su miktarını hesaplayan Bolomey Formülünden (Postacıoğlu, 1986-2) yararlanılmıştır. Ancak üretim sonunda deneysel olarak işlenebilmenin sağlanıp sağlanmadığı denetlenmiştir. SA içeren betonlarda ise bu formül kullanılmadan, deneysel yöntem yardımıyla su/çimento oranı 0,26ya düşürülmüştür.

3.2.3. Harç

Harç numuneler 3.2.2. de anlatılan beton numunelerin harç fazları olacak şekilde üretilmişlerdir. 3.2.2. de anlatılan SA içermeyen betondan 4-8 mm boyutları arasındaki kırmataş ve Bolomey Formülüne göre bu fraksiyona ait olan ıslatma suyu

ıkarılarak SA içermeyen harç numunelerin bileşimleri elde edilmiştir. SA içermeyen harç numunelerde imento : su : kumun çimentoya oranları 1 : 0,34 : 1,42 olarak belirlenmiştir. SA içeren harç numunelerde ise su miktarı işlenebilirliğe göre tayin edilmiş ve bu harçlarda imento : su : kumun çimentoya oranları 1 : 0,24 : 1,01 olarak elde edilmiştir.

3.3. Karıştırma, Yerleştirme ve Kr Koşulları

Hamur ve harçlar 1 dakika süresince 100 devir/dakika düşük hızda ardından 4 dakika süresince 200 devir/dakika yüksek hızda karıştırılmıştır. Betonlara ise 5 dakika düşük devirde karıştırma işlemi uygulanmıştır. Erken yaş deneyleri için üretilen hamur numuneler tam izole ortamdaki (Tİ) hacimsel otojen rötre deneyleri için derhal kondomun içine doldurularak sadece havadan izole, suyla kaplı ortamda (Hİ) hacimsel kimyasal rötre deneyleri için deney kabının içine aktarılarak 48 saat süresince $21\pm0,5$ °C sıcaklıktaki suya daldırılarak izotermal ortamda deneye tabi tutulmuşlardır. Uzun süre doğrusal otojen rötre numuneleri kalıplarına yerleştirilmiş, sertleşme başladığı anda ölçümlere başlanmış, 1 gün süresince kalıplarının içinde izole edilmiş durumda saklanarak bu süre sonunda kalıptan çıkarılmış ve numuneler polipropilen film tabaka ve alüminyum folyo ile izole edilerek otojen rötre ölçümlerine devam edilmiştir. Mekanik dayanım testleri için üretilen numuneler ise yine bir gün süresince kalıbın içinde izole durumda saklanmışlardır. 24 saatin sonunda kalıptan çıkarılan numunelerin yarısı otojen rötre deneylerinin yapıldığı koşullarda tamamen izole edilmiş durumda ve $21\pm0,5$ °C sıcaklıktaki ve % 65 rutubetli klimatize odada ve diğer yarısı ise 23 ± 2 °C deki kirece doğgun su içerisinde deney gününe kadar saklanmışlardır.

Erken yaş hidrasyon deneyleri için aynı karışım oranlı hamur numuneler plastik torbalar içinde izole edilip deney zamanına kadar $21\pm0,5$ °C sıcaklıktaki ve % 65 rutubetli klimatize odada saklanmışlardır. Bunun yanında bir seri numune üretimden hemen sora suya daldırılarak su içinde kürlenmiştir.

28. gün hidrasyon ısısı, hidrasyon derecesi ve civali porozimetre deneyleri deneyleri için hazırlanan hamur numuneler 1 cm çapında ve 15 cm yüksekliğindeki cam tüpler içinde deney tarihine kadar hava ve sudan izole $21\pm0,5$ °C sıcaklıktaki ve % 65 rutubetli klimatize odada saklandılar.

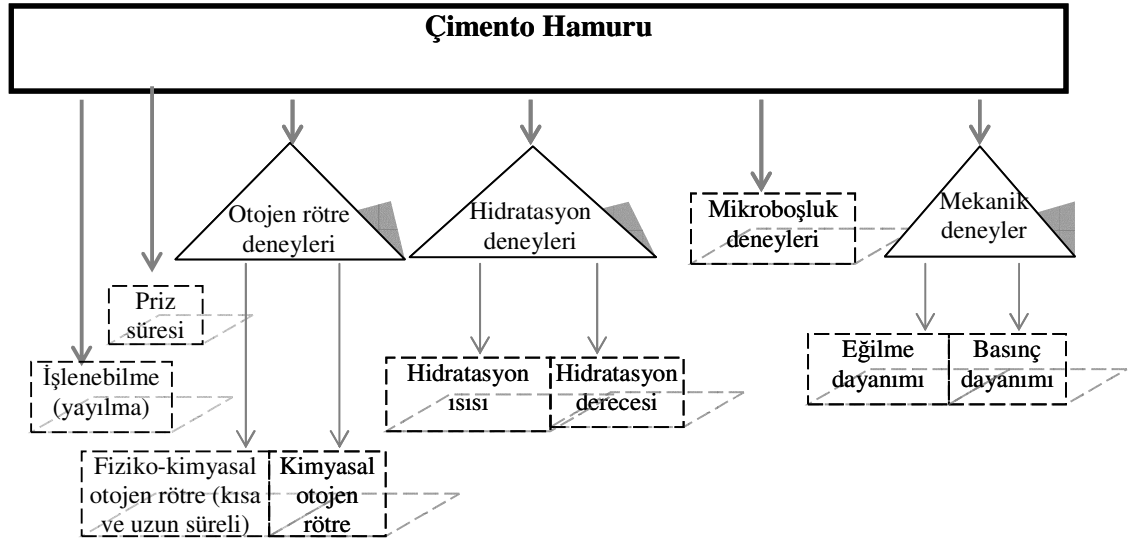
Dayanım ve uzun süreli lineer otojen rötre deneyi dışında tüm hamur numunelerde yerleştirme, **ASTM C 230** sarsma tablasında 1 cm yükseklikten 15 defa düşürülerek sağlandı. Mekanik dayanım ve uzun süreli lineer otojen rötre deneyleri için üretilen hamur, harç ve beton numunelerde ise yerleştirme standard RILEM sarsma tablasında 60 kez düşürülerek gerçekleştirildi. Bu yerleştirme işlemi segregasyondan kaçınmak amacıyla SA içeren beton, harç ve hamurlara uygulanmadı.

3.4. Uygulanan Deneyler

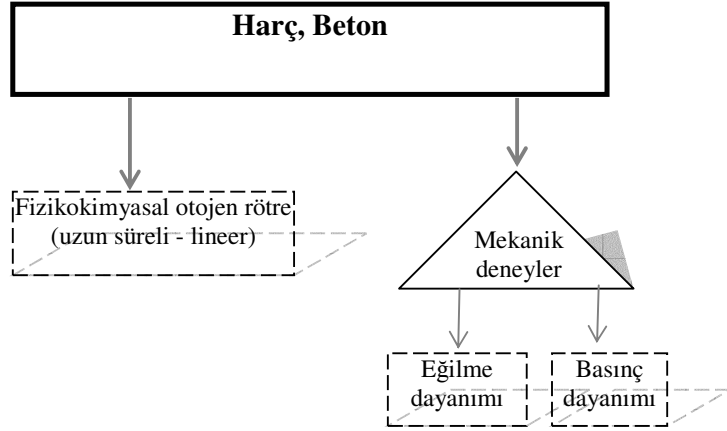
Beton ve harç üretimlerinde kullanılan agregalar üzerinde birim ağırlık, granülometri, organik madde ve ince madde deneyleri yapıldı. Bu deneylerden elde edilen agrega özellikleri Bölüm 3.1.1. de verildi. Çimentolar üzerinde ise fiziksel, kimyasal ve mekanik deneyler uygulandı ve sonuçlar Bölüm 3.1.2. de gösterildi.

Çimentolardaki alkali miktarlarının belirlenmesi için iki farklı deney tekniği uygulanmıştır. Bunlardan birincisi çimento bileşimindeki Na_2O ve K_2O miktarlarının belirlenmesi amacıyla uygulanan alev fotometrisi deney yöntemidir. Ancak bu yöntem suda çözünen iyonları belirlemek için yeterli olmadığından suda çözünen alkali iyonlarının belirlenmesi için atomik absorpsiyon deney tekniği kullanılmıştır. Atomik absorpsiyon ile suda çözünen alkali iyonlarının tayini deneyler TÜBİTAK-MAM’ de gerçekleştirildi. Çimentonun inceliği çimento hamurunun otojen rötresi üzerinde etkili olan etkenlerden biri olduğu için çimentonun incelik tayini üzerinde hassasiyetle durulmuş ve çimentoların tanecik boyut dağılımları Mastersizer-Laser tekniği ile elde edilmiştir. Çimento tane boyutu dağılımı (granülometri) deneyleri TÜBİTAK-MAM’ de MS 2000 Mastersizer lazer granülometri aleti ile yapılmıştır.

Hamur numuneler üzerinde uygulanan deneylerle harç ve beton numuneler üzerinde uygulanan deneyler iki ana gruba ayrılabilir. Hamur numuneler üzerinde uygulanan deneyler Şekil 3.1 de harç ve beton numuneler üzerinde uygulanan deneyler de Şekil 3.2 de şematik olarak gösterilmektedir. Uygulanan deneylerin ayrıntıları aşağıda sıra halinde verilmektedir.



Şekil 3.1: Hamur numuneler üzerinde uygulanan deneyler.



Şekil 3.2: Harç ve beton numuneler üzerinde uygulanan deneyler.

Fizikokimyasal otojen rötre (FKOR) ve kimyasal otojen rötre (KOR) açıklamaları Bölüm 3.4.2. de verilmiştir.

3.4.1. Priz, yayılma (işlenebilme) ve mekanik deneyler

3.4.1.1. Priz deneyleri

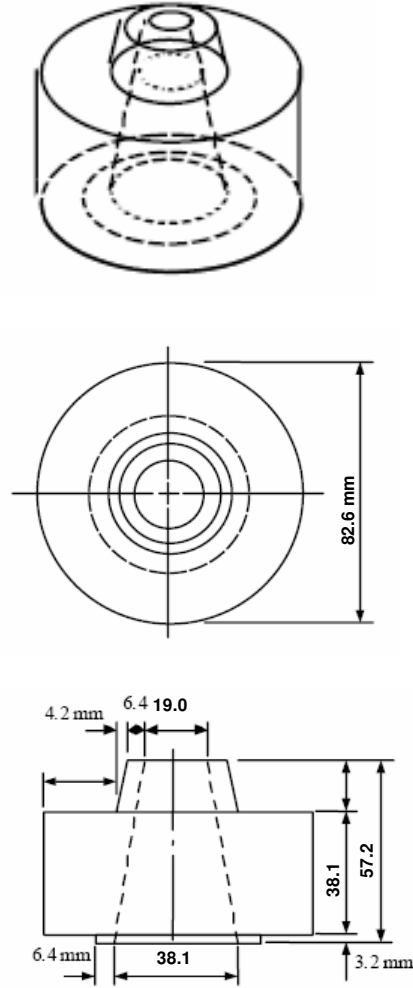
Çimento hamurları üzerinde Vicat priz deneyleri yapılmıştır. Deneylerde Şekil 3.3 de görülen otomatik Vicat aleti kullanılmıştır. Deneyler TS EN 196-3 (2002) standardına uygun olarak yapılmıştır. Otomatik Vicat aleti deney süresince 15 dakika arayla penetrasyon yapmaya programlanmıştır.



Şekil 3.3: Otomatik vicat aleti

3.4.1.2. Yayılma deneyleri

Taze haldeki hamur, harç ve betonların işlenebilirliklerini değerlendirmek amacıyla yayılma deneyleri uygulanmıştır. Yayılma deneyleri için hamurlarda Kantro (Aİtcin, 1998); (Kantro, 1980) mini slump konisi kullanılmıştır. Koninin detayları Şekil 3.4 de verilmektedir. Deney uygulanırken hamurlar koninin içine doldurulmuş ve yerleşmenin sağlanması için 3 mm kalınlıklı cam çubukla 15 defa şişlenmiştir. Koni çekildikten sonra hamur 1 cm yükseklikten 15 defa düşürülmüş ve yayılma oranı belirlenmiştir.



Şekil 3.4: Kantro mini slump konisi detayları (Kantro 1980)

Harç ($D_{\max}=4\text{mm}$) ve model betonların ($D_{\max}=8\text{mm}$) işlenebilirlik deneyleri ise 85 mm alt ve 35 mm üst çapa sahip ve yüksekliği 70 mm olan koni ile yapılmıştır. Harç ve beton deneylerinde hamurlarla aynı sarsma tablası prosedürü (1 cm yükseklikten 15 tekrar) uygulanmıştır.

3.4.1.3. Mekanik deneyler

Mekanik deneyler için 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiştir. Bu numunelerin üretimi sırasında standard RILEM deney ekipmanı kullanılmıştır. Herbir seri numuneden altışar adeti, karışım anından hemen sonra kalıplara dökülmüş ve bu andan itibaren dış ortamdan izolasyonları sağlanmıştır. 24 saatin sonunda kalıptan çıkarılan numunelerin yarısı izole koşullarda yarısı da su

içinde saklanmak üzere ayrılmıştır. Numuneleri iki farklı şekilde kürlemenin amacı, özellikle yüksek performanslı betonlarda çok etkili bir parametre olduğu belirtilen kürlemenin hamur, harç ve betonun mekanik özellikleri üzerinde nasıl bir etkisinin olduğunun ortaya çıkarılması amacıyla. İzole koşullarda saklanan numuneler polyester film ve alüminyum folyo ile sarılmış ve 20 °C ve % 65 rutubetli kür odasında deney uygulanacak güne kadar saklanmıştır. Suda kürlenmiş numuneler ise 23 °C deki kirece doymuş su içerisinde deney gününe kadar korunmuşlardır. Numuneler üzerinde mekanik deneyler 1 yıl sonunda uygulanmıştır. Kür süresi sonunda numunelere üç noktalı eğilme deneyi ve eğilme deneyinden ortaya çıkan parçalar üzerinde tek eksenli basınç deneyi uygulanmıştır.

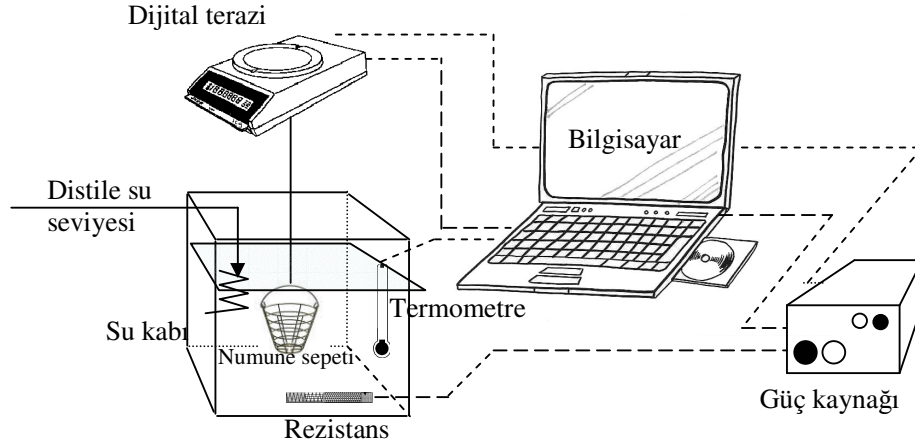
3.4.2. Otojen rötre deneyleri

Bu çalışmada otojen rötre niteliğine bağlı olarak iki gruba ayrılmıştır. Bunlar fizikokimyasal otojen rötre (FKOR) ve kimyasal otojen rötre (KOR) dir. FKOR deneyleri havadan ve sudan tam olarak izole edilen (Tİ) ve kendiliğinden kurumanın (self desiccation) daha etkin olduğu deneylerdir. KOR deneylerinde ise hava ile izolasyon su katmanı ile sağlanmaktadır (Hİ) ve kendiliğinden kurumanın varlığı ve etkinliği belirgin değildir.

3.4.2.1. Fizikokimyasal otojen rötre (FKOR) deneyleri

Hacimsel FKOR ölçümü

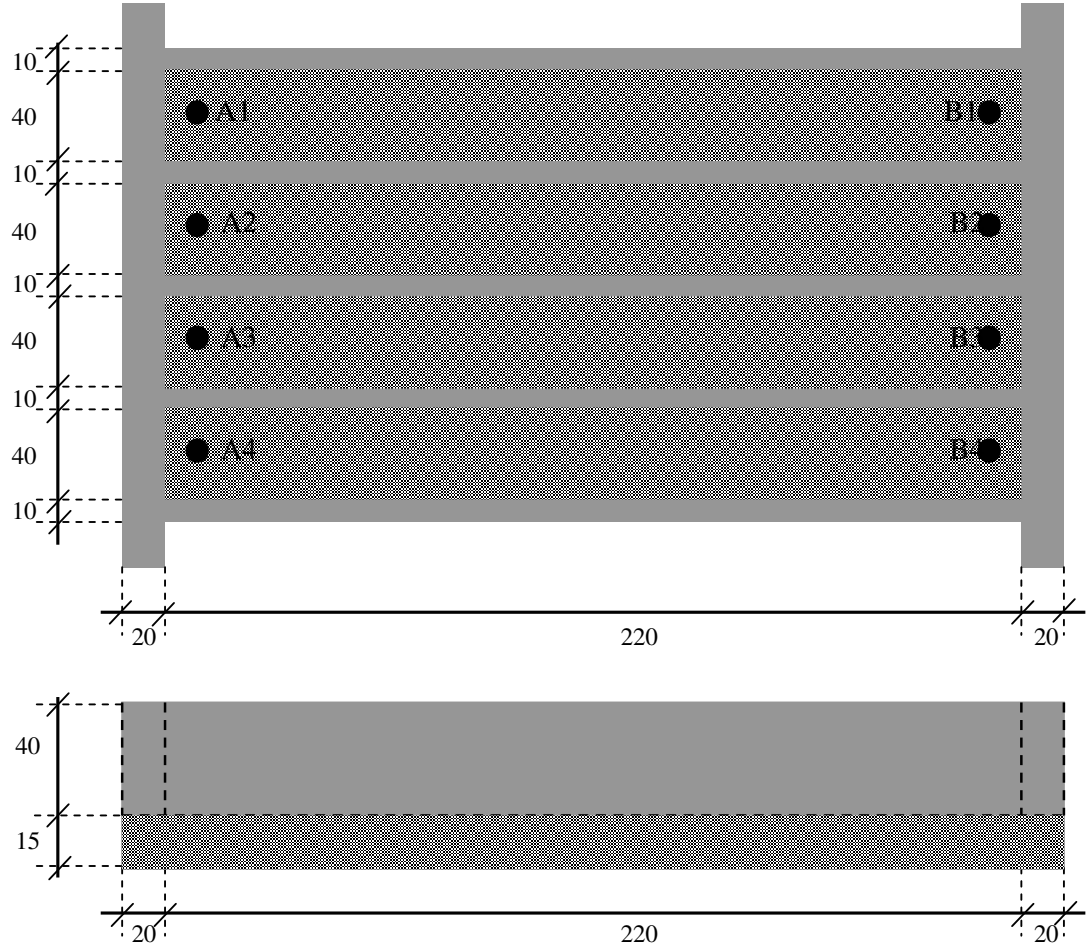
Hacimsel rötre ölçüm sistemi Arşimet prensibine dayanmaktadır. Karışım anından hemen sonra poliester bir kılıf (kondom) içine doldurulan çimento hamuru numunesi sıcaklığı 21 °C olan distile su içerisine daldırılarak tartıya bağlanmıştır. Oldukça küçük numunenin sabit sıcaklıklı su içinde tartılması ile FKOR, termik rötreden bağımsız kılınmıştır. Suyun sıcaklığının stabilitesi su içerisine konan termostatlı rezistans ile sağlanmıştır. Sistem, numunenin su içerisindeki ağırlığını ölçen 10^{-4} gram hassasiyetli dijital bir terazi ve suyun sıcaklığını ölçen termometredeki değerlerin bilgisayar aracılığıyla sabit zaman aralıklarında kaydedilmesini mümkün kılmaktadır. Numunenin su içindeki ağırlığı bilgisayar aracılığı ile 15 dakika ara ile kaydedilmiştir. Buradan yola çıkarak kondom içindeki çimento hamuru numunesinin hacmindeki değişim, kaldırma kuvvetinin değişiminden hesaplanmıştır. Bu yolla çimento hamuru numunelerinin hacminde zamanla oluşan büzülme elde edilmiştir. Hacimsel ölçüm sistemi Şekil 3.5 de verilmektedir.



Şekil 3.5: Hacimsel otojen rötre ölçüm sistemi.

Lineer FKOR ölçümleri

Uzun süre otojen rötre ölçümlerini gerçekleştirmek üzere çimento hamuru, harç ve betonlarda lineer otojen rötre ölçümleri yapılmıştır. Lineer ölçümlerde detayları Şekil 3.6 de verilen prizmatik kalıplar kullanılmıştır. Lineer ölçümler prizmatik numunelerin üzerine yapıştırılan A_n ve B_n pulları arasındaki mesafenin 0.001 mm hassasiyetli bir deformetre (DEMEC) ile ölçülmesiyle sağlandı. Kalıplar, iç boyutları 40x40x220 mm olacak şekilde özel olarak tasarlanmıştır. Kalıpların içi yağlandıktan sonra kalıp ve numune arasına polyester film tabaka serilmiş ve taze haldeki numuneler kalıbın içine dökülmüştür. Kalıbın içine uygulanan polyester tabaka kalıp üzerine de geçirilerek devamlılığı sağlanmış, böylece taze haldeki numunenin dışarı ile nem ilişkisi kesilmiş ve izolasyonu sağlanmıştır. Dış ortamdan böylece izole edilen numunelerin sertleşmesi beklenmiş ve yaklaşık 5. saat sonunda numunenin üzerine deformetre ile okuma yapabilmek için gerekli olan pullar yapıştırılmış ve ilk okumalar numuneler kalıp içerisindeyken yapılmıştır. Pullar yapıştırılacağı zaman polyester film tabaka kısa bir süre için lokal olarak kaldırılmış ve pul yapıştırma işlemi tamamlandıktan sonra tekrar eski haline getirilmiştir. Numuneler 1 gün sonunda kalıplardan çıkarılmış ve 20 °C ve % 65 rutubetli kür odasında polyester film tabaka üzerine bir kat da alüminyum folyo kaplanarak saklanmaya devam edilmiştir. Belirli zaman aralıklarında rötre ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler bir yıl sürmüştür.



Şekil 3.6: Lineer otojen rötre ölçüm sistemi ve kalıp boyutları (mm)

3.4.2.2. Kimyasal otojen rötre (KOR) deneyleri

Kimyasal rötrenin çimento hamurunun mutlak (katı) hacminin büzülmesinden kaynaklandığı daha önce Bölüm 2.1.1. de belirtilmişti. Kimyasal rötre ölçümleri için genellikle dilatometrik (Le Chatelier) yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemle göre taze haldeki iyice karıştırılmış ve hava boşluğu minimuma indirgenmiş çimento hamuru cam tüp içine konur ve cam tüpün üzerine derecelendirilmiş cam bir boru eklenir. Daha sonra cam tüp içindeki taze haldeki çimento hamurunun üzerine su eklenir, cam tüpün ağzı sıkıca kapatılır ve su seviyesi zamana göre izlenir. Kimyasal rötre priz başlangıcından sonra büyük ölçüde çimento hamurunun içinde şekillendiğinden bu yöntemle izlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada kimyasal rötre büyüklükleri belirlenirken önce dilatometrik yöntem denenmiş ve bu sistem, hamurdaki hava boşluklarının varlığı ve yeterli hassasiyet

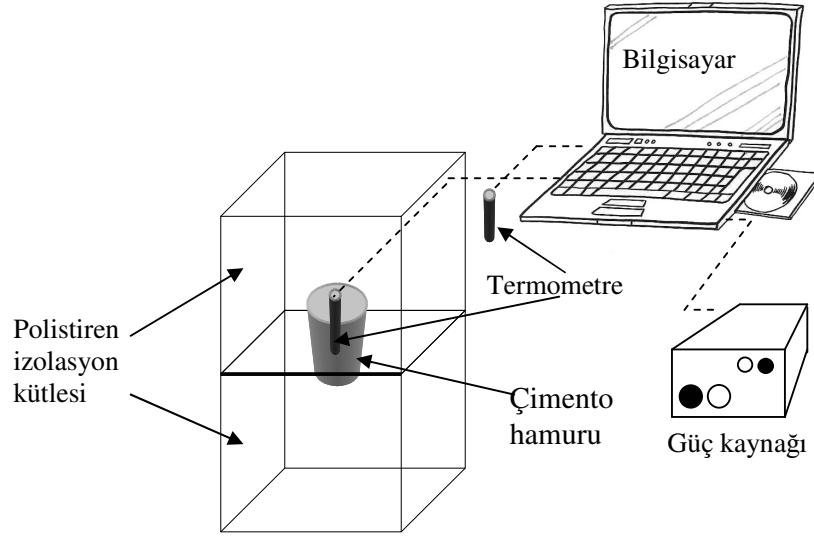
sağlanamadığından farklı bir yöntem kullanılmıştır. Çimento hamuru 80 mm çapında ve 10 mm yüksekliğindeki PVC kap içine üretimden hemen sonra doldurulmuştur. Numuneler alınırken kap içindeki hamur yüksekliğinin 7 mm civarında olmasına dikkat edilmiştir. Zira kimyasal rötre ölçümlerinde numune yüksekliğinin deney sonuçlarını etkilediği ve buna dikkat edilmesi gerektiği belirtilmektedir. Daha sonra kap içinde bulunan taze çimento hamuru numunesi su içerisine daldırılıp asılarak 10^{-4} gr hassasiyetli terazi ile ağırlıkları 15 dakika ara ile kaydedilmiştir. Bu sistemde de FKOR tam izole otojen rötre ölçümlerinde olduğu gibi su içindeki rezistans yardımıyla su sıcaklığı sabit tutulmuştur. Arşimet prensibine göre katı kısım hacmi azalan cismin yüzen ağırlığı artmakta, numune hacmindeki azalma (büzülme) böylece elde edilmektedir. Kimyasal otojen rötre ölçüm sistemi prensip olarak fizikokimyasal otojen rötre ölçüm sistemine benzerdir. Aralarındaki fark FKOR ölçümlerinde havadan ve sudan izole edilmiş numune kullanılırken kimyasal rötre ölçümlerinde numunenin üzerinde izolasyon bulunmaması ve hava ile izolasyonun numune yüzeyindeki su ile sağlanmasıdır.

3.4.3. Hidratasyon deneyleri

3.4.3.1. Hidratasyon ısısı deneyleri

Erken yaşta hidratasyon ısısı ölçümü

Hidratasyon sırasında çimento hamurunda ortaya çıkan ısısının ölçülmesi için 30x30x40 cm boyutlarında polistirenden yapılmış kalorimetrik bir kaptan yararlanılmıştır. Bu kabın içinde alt çapı 5 cm üst çapı 8 cm olan polistren konik bir hücre bulunmaktadır. Çimento hamurları üretildikten hemen sonra bu hücre içerisine konmuş, kalorimetre kabı kapatılarak sıcaklıklar kaydedilmeye başlanmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.7 de verilmektedir. Bilgisayara bağlı iki adet dijital termometreden biri kalorimetre iç sıcaklığını ölçerken diğeri de eşzamanlı olarak dış ortam sıcaklığını kaydetmektedir. Sıcaklık değerleri yardımıyla salıverilen hidratasyon ısıları daha sonra hesaplanmıştır.

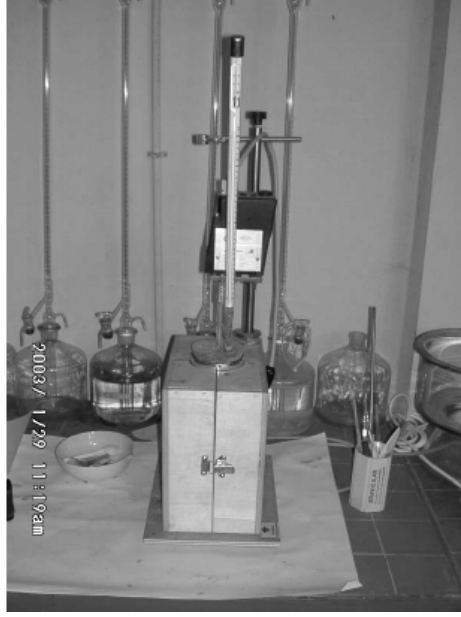


Şekil 3.7: Çimento hamurunda salıverilen hidrasyon ısısı deney sistemi

28 gün hidrasyon ısısı ölçümü

Hidrasyon ısılarının belirlenmesinde **ASTM C186 (1998)** ve **TS 687 (1985)** standartları esas alınmıştır. Deneylerde diğer deneylerde kullanılan hamur numuneleri aynı karışım oranlarıyla kullanılmıştır. Hidrasyon ısısı deneyleri için üretilen hamurlar 28 gün 20 °C sabit sıcaklıkta ve nemden izole edilmiş koşullarda saklanmış ve bu süre sonunda deneyler uygulanmıştır.

Hidrasyon ısısı ölçüm aygıtı bir kalorimetredir, cam termos kabı, sabit hızlı karıştırıcısı ve 0.01 °C duyarlıklı Beckmann termometresinden ibarettir. Hidrasyon ölçüm aygıtının resmi Şekil 3.8 de verilmektedir. Sonuç 28 günlük hidrasyon yapmış çimentonun bu aşamaya kadar ortaya çıkardığı ısı miktarını vermektedir. Bu değerler, sertleşmiş çimentoyu nitrik asit içinde çözerek ve bu çözüm esnasında çıkan ısı miktarını anhidr çimentonunki ile karşılaştırarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.8: ASTM C186-98 Hidratasyon ısı ölçüm kalorimetrisi

3.4.3.2. Hidratasyon derecesi deneyleri

İleri yaş hidratasyon derecesi deneyleri

Hidratasyon derecesi, çimento tanelerinin ne oranda hidrate olduğunu gösteren bir büyüklüktür. Hidratasyon derecelerinin belirlenmesinde T. Powers' ın önerdiği buharlaşmayan su miktarının tesbit edilmesi yöntemi kullanılmıştır (**Powers ve Brownyard 1946**). Bu yöntemle göre, sertleşmiş çimento hamuru numunelerinde saptanan buharlaşmayan su miktarı ile çimento tanelerinin tamamen hidrate olabilmeleri için gerekli su miktarı esas alınarak, hidratasyon dereceleri ($\alpha=HD$) hesaplanmaktadır.

Bu hesapta eşitlik 3.1 ve 3.2 kullanılmaktadır.

$$\frac{W_n}{C} = 100 \left[\frac{W_k - W_{hi}}{W_{hi}} - W_i \right] \quad (3.1)$$

$$HD = \alpha = 100 \left[\frac{W_n / C}{0.23} \right] \quad (3.2)$$

Burada;

Wn: Buharlaşamayan su miktarı

Wk: hidrate imentonun 105 °C lik etüvden çıktıktan sonraki kuru ağırlığı

Whi: hidrate çimentonun kızdırma işlemi sonundaki ağırlığı

Wi: hidrate olmamış çimentonun kızdırma kaybının oransal ifadesi.

HD: Hidratasyon derecesi değerleridir.

Hidratasyonun erken aşamalarında hidratasyon derecesi deneyleri

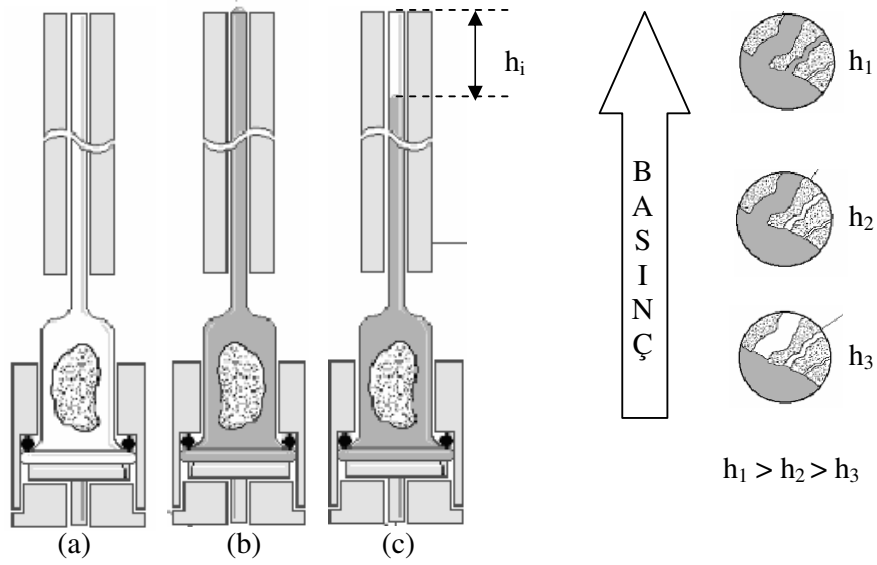
Erken yaş hidratasyon derecesi tayini deneyleri tez çalışması açısından gerekli bulunmuştur. Bunun için üretilen tüm imento hamurları üzerinde 5, 10, 24 ve 48. saatlerde uygulanmıştır. Numuneler bahsedilen saatlerde toz haline getirildikten ve 250µm göz açıklıklı elekten elendikten sonra hidratasyonlarını durdurmak amacıyla 2-propanol ile muamele edilmiş ve elde edilen çamur süzölerek 2-propanolun fazla kısmı uzaklaştırılmıştır. Hidratasyonu duran imento hamuru numunesi yaklaşık 4'er g. lık üç parçaya ayrılarak 100 °C deki etüvde 4 saat süresince bağlanmamış suyun buharlaşması amacıyla bekletilmişlerdir. Bu sürecin sonunda desikatöre aktarılan imento hamurlarının ağırlıkları belirlenmiştir. Bağlanmış su miktarını (**Powers ve Brownyard 1946**) tayin etmek amacıyla numuneler daha sonra derhal 1000 °C de bulunan etüve aktarılmış ve 3 saat süresince burada bekletilmişlerdir. Bu sürecin sonunda tekrar desikatöre alınan numunelerin ağırlıkları belirlenmiş ve hidratasyon dereceleri tayin edilmiştir. Deney düzeninin sağlıklı çalışıp çalışmadığını ve 2-propanolun hidratasyon kinetiği üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla deneylere başlamadan önce 2-propanol ile bir deneme üretimi yapılmış ve hidratasyon üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Bu deneme üretiminde C1 imentosu normal üretimlerde olduğu gib 0.25 su/imento oranıyla üretilmiştir. Üretilen numuneler 5. saat sonunda iki ana parçaya ayrılmış ve bu numunelerin yarısı 2-propanol ile muamele edilmiştir. Diğer yarısı ile propanol ile karıştırılmadan saklanmıştır. 5. saatte propanol ile karıştırılan numune üzerinde hidratasyon derecesi tayini derhal uygulanmış ve hidratasyon derecesi %13.2 olarak bulunmuştur. Aynı deney 24. saatte propanol ile karıştırılan ve karıştırılmayan numuneler üzerinde ayrı ayrı uygulanmış ve hidratasyon dereceleri sırasıyla %14.0 ve %32.0 olarak elde edilmiştir. 5 inci ve 24 uncu saatler sonunda propanol ile karıştırılan numunelerden elde edilen hidratasyon derecelerinin yakınlığı gözönüne alindığında deneyin

sağlıklı işlediği ve 2-propanolün hidratasyonun ilk aşamalarında hidratasyonu durdurmada başarılı olduğu saptanmış ve deneylere devam edilmiştir. Genelde hidratasyon derecesi tayininde hidratasyon durdurulmamakta, bu da 100 °C deki etüvde numuneyi ısıtırken hidratasyonun bir miktar daha ilerlemesine yol açmaktadır. Bundan dolayı elde edilen sonuçlar güvenilirliğini yitirmektedir.

Hidratasyon dereceleri hesaplanırken ileri yaş hidratasyon deneylerinde kullanılan hesap yöntemi izlenmiştir.

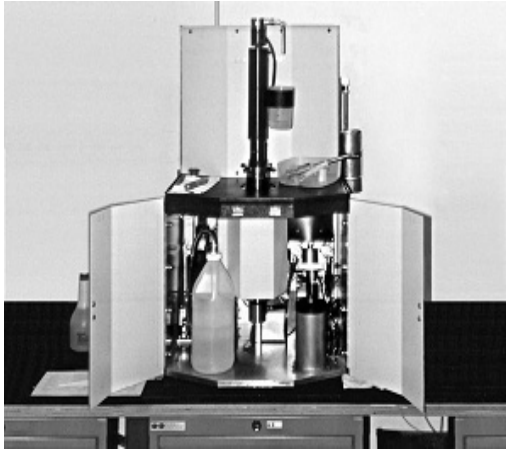
3.4.4. Civalı porozimetre (MIP) deneyleri

Çimento hamurlarının boşluk boyut dağılımlarının belirlenmesi amacıyla Civalı Porozimetre (MIP) deney tekniği kullanılmıştır. Deneyler İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, diğer deneylerde kullanılan hamur numuneleri aynı karışım oranlarıyla kullanılmıştır. Deney numuneleri üretildikten sonra 1 cm çapındaki cam tüplere doldurulmuş ve tüplerin ağzı parafin ile izole edilmiştir. 24 saat ve 28. gün saklandıktan sonra cam tüpler kırılmış ve MIP bunlara uygulanmıştır. Bu numuneler dışında derhal uygulanan su kürünün etkisini incelemek için, bir kısım numuneler üretimin hemen ardından su içine bırakılmış ve MIP bunlara uygulanmıştır. MIP 24 saat ve 28. günde uygulanmıştır. Civalı porozimetre deneyinde, deney için hazırlanan numune kapalı bir hazne içerisine yerleştirildikten sonra hazneye civa doldurulmuş ve bu civanın giderek artan basınç ile numuneye nüfuz etmesi sağlanmıştır. Numune haznesine ve deneye ait detaylar Şekil 3.9 a,b,c de gösterilmektedir. Şekil 3.9 (a)' da numune hazne içine yerleştirilmiş ve boşluklardaki suyu atmak üzere vakum uygulanmıştır. Şekil 3.9 (b)' de görülen detayda ise civa numune haznesine doldurulmaktadır. Şekil 3.9 (c)' deki detayda ise numune üzerine civa basıncı uygulanmış, düşük basınçlarda kalın kılcal boşluklardan başlayarak numune içine civa dolmaya başlamıştır. Şekilde görüldüğü gibi civa önce kalın kılcal boşluklara dolmaya başlamaktadır. Basınç arttığında daha ince boşlukları da doldurmaktadır. Deney sistemine ait yazılımdan faydalanarak numune içerisindeki boşluk dağılımları numuneye nüfuz eden civa hacmine bağlı olarak (ml/g) tespit edilmiştir. Bu yazılım civanın belirli bir basınçta belirli boyutlardaki boşluklara girdiği gerçeğinden hareketle ve boşlukların silindirik olduğunu kabul ederek boşluk boyutlarını belirlemektedir.



Şekil 3.9: Civalı porozimetre deneyi detayları

Poremaster 33 GT marka civalı porozimetre cihazı ile yapılan boşluk boyut dağılımı deneylerinde ısıtma açısı 130°C , civa yüzey gerilmesi 485dyn/cm^2 ve maksimum civa basıncı 33000 psi ($\sim 230\text{ MPa}$) olarak kullanılmıştır. Kullanılan civalı porozimetre Şekil 3.10 da gösterilmektedir.



Şekil 3.10: Poremaster 33 GT civalı porozimetre

3.4.5. Fotogrametrik ölçümler

Bu çalışmada mekanik yolla yapılan lineer ölçümler, fotogrametrik yöntem ile kontrol edilmiş ve her iki yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Fotogrametrik ölçüm otojen rötre ölçümleri için literatüre yeni bir ölçme tekniği olarak sunulacaktır. Bu yöntemde numuneye herhangi bir temas olmadığı için numune taze haldeyken de şekil değiştirmeleri elde etmek mümkün olabilmektedir. Deneyin herhangi bir aşamasında izolasyon açılmadığından numunede kuruma rötresi olma sakıncası yoktur. Bunların yanında diğer ölçüm sistemlerine bir üstünlüğü de üçüncü boyuttaki oturma, çökme gibi şekil değiştirmelerin de elde edilebilmesidir.

Çalışmanın bu bölümü İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü Fotogrametri Anabilim Dalı ile işbirliği içinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler 20°C sabit sıcaklıklı ortamda yürütülmüştür. Deney düzeneği rijit bir çerçeveye bağlı yüksek çözünürlüklü dijital kamera ve bu kameraların bağlandığı bir bilgisayardan ibarettir. Şekil 3.11 de örnek olarak gösterilen sistemde bulunan kameralar, Şekil 3.12 de gösterilen numunenin fotoğrafını değişik açılardan belirli zaman aralıklarında çeker ve bilgisayara aktarır.



Şekil 3.11: Örnek dijital fotogrametrik sistem

Şekil 3.13 de deneylerde kullanılan numune görülmektedir. Fotogrametrik ölçümlerde ölçümler numune üzerine ve kalibrasyon alanına sabitlenen hedef noktalarının koordinatlarının tespitiyle elde edilir. Bu deneysel çalışmada iki farklı hedef kullanıldı. Herbir numune üzerine 42 nokta ve referans kalibrasyon alanı

üzerinde de 24 nokta kullanıldı. Fotogrametrik veri işleme ise Australis dijital fotogrametrik yazılım ile yapıldı.

Güvenilir ve iyi sonuçlar elde edebilmek için siyah, merkezi beyaz daire olan hedef noktaları kullanıldı. Fotogrametrik yazılım hedef noktaların iki boyutlu uzayda merkezlerini otomatik olarak bulmaya yarayan bir algoritma kullanır. Daha sonra bu merkezler üç boyutlu koordinat hesabında kullanılırlar.



Şekil 3.12: Dijital fotogrametrik sistem için kullanılan numune ve kalibrasyon alanı

Bu çalışmada çözünürlüğü 2592x1944 piksel ve piksel boyutu $2,7 \times 2,7 \mu\text{m}$ olan Canon PowerShot A95 dijital kamera kullanıldı. Çekimler sırasında herhangi bir andaki koordinatları elde etmek amacıyla 70 cm yükseklikten, değişik açılarda 8-10 çekim yapıldı.

Deney sonunda istenilen zaman aralıkları için noktalar arasındaki koordinat ve kotların farkları elde edilmiş hedef noktalarının birbirine göre bağlı yerdeğiştirmeleri bulunmuş oldu. Bu yerdeğiştirme değerleri rötre deformasyonunun hesaplanmasında kullanıldı.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Malzeme Deneyleri, Karışım Oranları ve Yardımcı Deneyler

4.1.1. Çimento deneyleri

Çimentolar üzerinde standard kimyasal, fiziksel ve mekanik deneyler yapıldı. Elde edilen sonuçlar Bölüm 3 de Tablo 3.3, 3.4 ve 3.5 de verildi. Ayrıca, alkali miktarlarının daha detaylı belirlenmesi amacıyla alev fotometrisi (Nuh Çimento) ve atomik absorpsiyon (TÜBİTAK, MAM) deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 4.1’de verilmektedir. Alev fotometresi toplam alkali miktarlarını, atomik absorpsiyon ise suda çözünen alkali miktarlarını vermektedir.

Tablo 4.1: Çimentolardaki alkali miktarları (%)

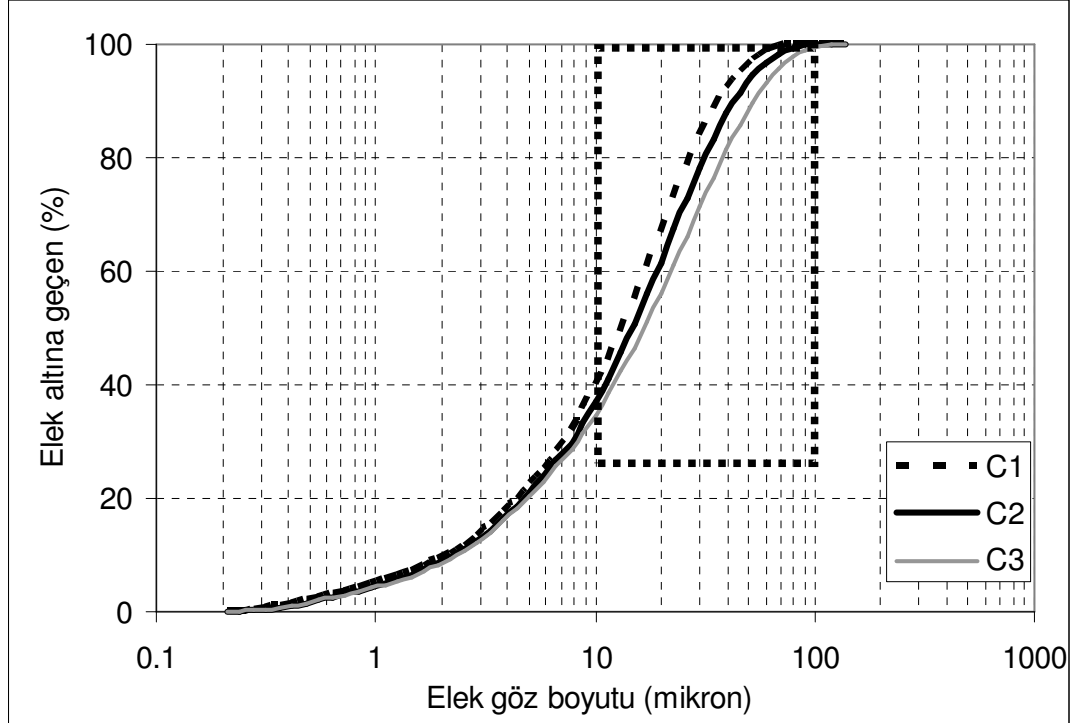
Çimento numune kodu	Alev Fotometresi (toplam)		Atomik Absorpsiyon (çözünen)	
	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O
C1	0,230	0,730	0,084	0,342
C2	0,230	0,890	0,067	0,563
C3	0,320	1,180	0,142	0,705

Diğer bir özel çimento deneyi olarak, Mastersizer-Laser granulometri deneyi yapılmıştır(TÜBİTAK-MAM). Tane boyut dağılımları Tablo 4.2’ de verilmektedir.

Tablo 4.2: Çimento tane boyut dağılımı

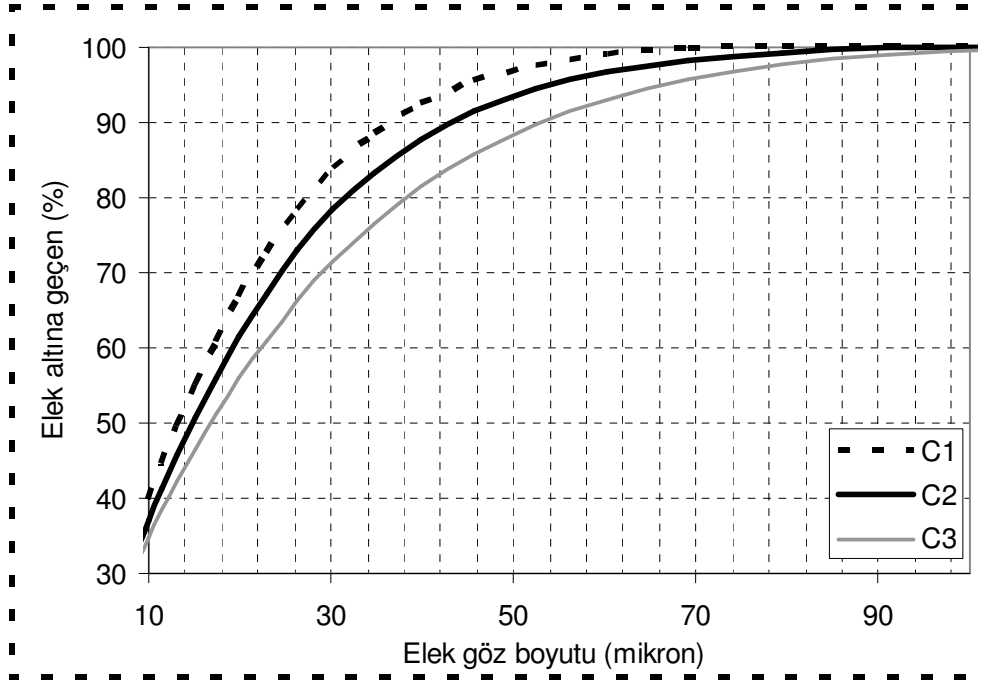
Elek göz boyutu (µm)	Elek altına geçen (%)		
	C1	C2	C3
0,209	0,04	0,00	0,00
0,479	2,07	1,58	1,57
1,096	5,59	4,97	4,72
2,512	11,96	11,04	10,61
5,754	25,53	23,78	22,92
13,183	49,45	45,79	42,35
30,200	83,9	78,38	71,42
69,183	99,77	98,29	95,75
138,038	100,00	100,00	100,00

Çimentoların granülometrik dağılımlarının grafiği Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Bu şekilde, çimentoların 10 μm den daha küçük boyutlu olan kısmında boyut açısından birbirinden çok farklı olmadığı görülmektedir. Şekil 4.2’de verilen büyük ölçekli kısım incelendiğinde bu boyutun üzerinde her üç çimento için tane boyut dağılımı farklı olmaktadır.



Şekil 4.1: Çimentoların semi-logaritmik ölçekle granulometri eğrileri.

Kesikli çizgilerle sınırlanan bölge, normal ölçekle çizilmiş, elde edilen eğriler Şekil 4.2 de gösterilmiştir. 10-100 μm aralığında herbir çimento için incelik faktörleri hesaplanmış ve C1, C2, C3 çimentoları için sırasıyla 376, 438 ve 513 değerleri bulunmuştur.



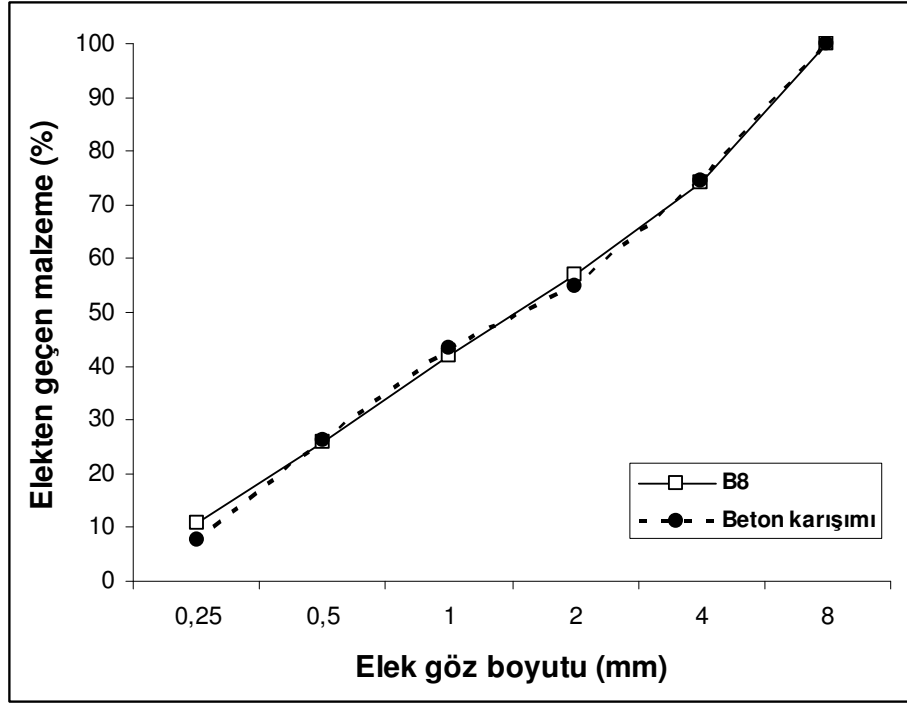
Şekil 4.2: Çimentoların 10µm'den büyük boyutlu kısmının normal ölçekle çizilen granulometri eğrileri.

4.1.2. Agrega karışımları

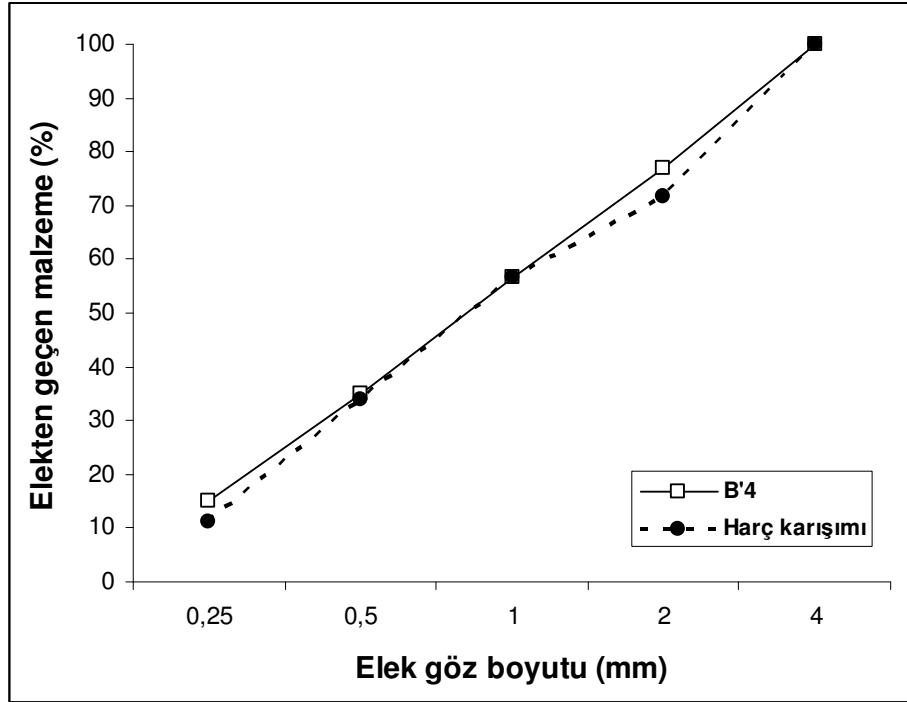
Betonda kullanılan agrega karışımının granulometrisi B8 eğrisine yakın olacak şekilde seçilmiş ve betonda kırmataş 0,40 oranında dere kumu ise 0.60 oranında kullanılmıştır. Harçlarda kullanılacak agrega için 0,73 oranında dere kumu, 0,27 oranında kırma kum kullanılmıştır. Böylece harcın agrega fazı, betonun 4'mm altındaki agrega fazına eşitlenmiştir.

Tablo 4.3: Beton ve harç agregalarının granulometrik bileşimleri

Elek Göz Boyutu (mm)	Elekten Geçen Malzeme (%)	
	Karışım-Harç	Karışım-Beton
8	100	100
4	100	75
2	72	55
1	57	43
0.5	34	26
0.25	11	8



Şekil 4.3: Betonda kullanılan agrega karışımının granülometrisi.



Şekil 4.4: Harçta kullanılan agrega karışımının granülometrisi.

B'4 değerleri B8 eğrisinin 4 mm üzerinin % 100'e tamamlanmasıyla elde edilmiştir.

4.1.3. Karışımlar

4.1.3.1. Hamur

Bölüm 3.2.1. de anlatıldığı şekilde, SA katkı içeren ve içermeyen tüm çimentolara ait hamur numuneleri üretilmiştir. SA içermeyen hamur numunelerin S/Ç oranı 0,25 olarak seçilmiştir. Çimento miktarının ağırlıkça %0,75 i oranında SA içeren hamur numunelerde S/Ç oranı 0,20 dir.

4.1.3.2. Betonların bileşimleri

Karışım prensipleri Bölüm 3 de verilen beton karışımlarının teorik bileşimleri hesaplanarak Tablo 4.4. de düzenlenmiştir. Üretilen betonların 700 kg/m³ çimento içermesi ve katkısız betonlarda S/Ç oranı 0,42, katkılılarda 0,26 olarak öngörölmüş ve beton içindeki hava miktarları %1 olarak tahmin edilmiştir.

Tablo 4.4: Üretilen betonların teorik bileşimleri

Numune	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Kırmataş (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	SA (%)	Hava (%)
SA içermeyen (C1,C2,C3)	700	294	509	742	0,00	1
SA içeren (C1,C2,C3)	700	182	631	918	0,75	1

Teorik bileşimlerine uygun olarak betonlar üretildiler; bu betonlar üzerinde birim ağırlık deneyleri yapılarak betonların gerçek bileşimleri elde edildi. Hesaplanan gerçek bileşimler Tablo 4.5. de verilmektedir. Tablonun yedinci kolonunda yer alan hava miktarı değerleri hesapla saptanmıştır.

Tablo 4.5: Betonların gerçek bileşimleri

Numune Kodu	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Kırmataş (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	SA (kg/ m ³)	S/Ç	Bir.Ağ. (kg/m ³)	Hava (%)
C1B	706	296	513	748	0,0	0,42	2263	0,2
C2B	706	297	514	749	0,0	0,42	2262	0,1
C3B	706	296	513	748	0,0	0,42	2266	0,2
C1SAB	701	182	631	919	5,3	0,26	2422	1,0
C2SAB	697	181	629	914	5,2	0,26	2433	1,4
C3SAB	698	181	629	915	5,2	0,26	2423	1,3

4.1.3.3. Harçların bileşimleri

Harçlar Bölüm 3 de de ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi betonların 4 mm'nin altında kalacak kısmı alınarak üretilmişlerdir. Harç bileşimleri hesaplandığında harçların 1 m³ deki çimento dozajı SA içeren numuneler için 814 kg, SA içermeyen numuneler için ise 787kg. dır.

Tablo 4.6. da üretilen harçların gerçek bileşimleri verilmektedir. Harçların gerçek bileşimleri ve hava miktarları beton numunelerde yapıldığı gibi hesaplanmıştır.

Tablo 4.6: Harçların gerçek bileşimleri

Numune Kodu	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Kırmataş (0-4mm) (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	SA (kg/m ³)	S/Ç	Bir. Ağ. (kg/m ³)	Hava (%)
C1HÇ	790	321	212	837	0,0	0,41	2160	2,7
C2HÇ	786	320	211	833	0,0	0,41	2150	3,2
C3HÇ	788	320	211	835	0,0	0,41	2155	3,0
C1SAHÇ	806	199	268	1057	6,0	0,25	2330	4,9
C2SAHÇ	803	198	267	1052	6,0	0,25	2330	5,3
C3SAHÇ	803	198	267	1052	6,0	0,25	2320	5,3

4.1.4. Priz deneyleri sonuçları

Üretilen hamur numuneler üzerinde Vicat priz aleti ile priz süresi tayini deneyleri yapılmış ve deney sonuçları Tablo 4.7 de verilmiştir.

Tablo 4.7: Hamurların priz süreleri

Numune Kodu	Priz Başlangıcı (saat:dakika)	Priz Sonu (saat:dakika)	Priz Süresi (saat:dakika)
C1HM	01:00	05:00	04:00
C2HM	01:45	05:00	03:15
C3HM	01:45	04:45	03:00
C1SAHM	02:00	03:15	01:15
C2SAHM	02:00	03:30	01:30
C3SAHM	01:30	03:15	01:45

4.1.5. İşlenebilme deneyleri sonuçları

Tablo 4.8 de, sarsma tablasında bölüm 3.4.1. de tariflendiği şekilde yapılan yayılma deneyi sonuçları gösterilmektedir. Buradaki yayılma değerleri, koninin alt çapına

göre çimento hamuru, harç ve betonun çapında sarsma tablasında 15 düşürme sonunda meydana gelen artış yüzdesini göstermektedir.

Tablo 4.8: Hamur, harç ve betonların yayılma değerleri

Çimento Cinsi	Çimento Hamuru Yayılma (%)	Harç Yayılma (%)	Beton Yayılma (%)
C1	128	6	53
C2	136	11	53
C3	149	20	51
C1+SA	267	76	100
C2+SA	294	65	88
C3+SA	189	41	76

Not: SA süperakışkanlaştırıcı içeren numuneleri göstermektedir.

4.1.6. Mekanik dayanım deneyleri

Mekanik dayanım deneyleri Bölüm 3.4.1. de tariflendiği şekilde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.9-4.11 de verilmektedir. Tablo 4.9 da SA içermeyen C1 ve C3 çimento hamurlarının erken yaşlardaki (ilk 48 saat) basınç dayanımları gösterilmektedir. Tablo 4.10 ve 4.11 de tüm numunelere ait 1 yıllık eğilme ve basınç deneyleri sonuçları verilmektedir. Eğilme deneyleri 3, basınç deneyleri ise 6 deney sonucunun ortalaması olarak alınmaktadır.

Tablo 4.9: Erken yaş izole saklanmış hamur numune basınç deneyi sonuçları

	Basınç Dayanımı (N/mm ²)			
	5 saat	10 saat	24 saat	48 saat
C1HM	0,5	26,3	71,3	80,5
C3HM	0,3	27,5	61,6	70,2

Tablo 4.10: Eğilme deneyi sonuçları (1 yıl)

Çimento Cinsi	Çimento Hamuru (N/mm ²)		Harç (N/mm ²)		Beton (N/mm ²)	
	Suda	İzole	Suda	İzole	Suda	İzole
C1	3,7	10,1	14,4	13,8	8,9	10,7
C2	7,1	11,7	13,8	14,3	11,6	11,3
C3	3,5	9,7	12,9	14,0	12,1	12,5
C1+SA	7,2	13,8	16,2	18,0	10,1	11,5
C2+SA	4,4	14,1	14,0	17,6	11,0	11,3
C3+SA	3,8	14,0	13,5	18,8	11,3	11,9

Not: SA süperakışkanlaştırıcı içeren numuneleri göstermektedir.

Tablo 4.11: Basınç deneyi sonuçları (1 yıl)

Çimento Cinsi	Çimento Hamuru (N/mm ²)		Harç (N/mm ²)		Beton (N/mm ²)	
	Suda	İzole	Suda	İzole	Suda	İzole
C1	114,4	98,1	107,3	78,3	84,8	79,2
C2	118,8	86,0	94,1	68,5	92,2	61,9
C3	75,5	88,8	109,4	73,8	82,3	54,4
C1+SA	109,0	128,4	107,0	105,3	97,5	95,2
C2+SA	129,8	120,9	110,3	100,4	100,3	91,9
C3+SA	131,9	125,0	125,0	105,0	105,2	85,0

Not: SA süperakışkanlaştırıcı içeren numuneleri göstermektedir.

4.2. Hidratasyon Deneyleri

Otojen rötre gelişimini açıklamak için bazı gelişmelerin belirlenmesi gereklidir. Bunlar, malzeme ön deneyleri dışında araştırılacak yapısal gelişme ve nitelik özellikleridir. Bu deneyler hidratasyon ve mikroyapının incelenmesine yöneliktir. Hidratasyonun incelenmesinde, hidratasyonun gelişme sürecindeki hidratasyon dereceleri, hidratasyon ısılarının seviyeleri ve salıverilme hızları ele alınmıştır. Mikroboşluk deneyleri ile sertleşmiş numunelerde oluşmuş kılcal boşlukların inceliklerini, sürekliliğini, dağılımlarını, miktarlarını belirlemek amaçlanmıştır.

4.2.1. Hidratasyon derecesi deneyleri

Otojen rötre oluşma sürecinde hidratasyonun gelişmesini incelemek için hidratasyonlar 2-propanol katılarak belirli sürelerde durdurulmuş ve hidratasyon dereceleri bu süreler için saptanmıştır. Tablo 4.12. bu sürelerdeki hidratasyon derecelerini göstermektedir.

Tablo 4.12: Hidratasyon dereceleri (%)

Numune	Tam izole durumda kürlenmiş (Tİ)					Su içinde havadan izole (Hİ)			
	5 saat	9.5 saat	24 saat	48 saat	28 gün	5 saat	9.5 saat	24 saat	48 saat
C1	19,4	26,2	33,0	41,6	47,3	14,2	21	33,4	42,7
C2	23,5	36,1	42,2	50,6	49,2	17,3	33,0	43,1	54,5
C3	22,7	26,6	35,5	38,1	50,6	16,9	20,9	37,7	43,4
C1SA	10,0	20,7	26,2	34,3	36,2	9,6	18,8	21,0	29,4
C2SA	15,7	22,0	39,2	47,3	48,0	15,5	25,5	40,2	47,8
C3SA	18,0	28,0	36,4	40,3	40,3	21,6	31,2	40,7	47,3

4.2.2. Hidratasyon ısısı deneyleri

Tablo 4.13. de ilk 24 saat zarfında çimentonun hidratasyonu süresince çimento hamurunun salıverdiği toplam ısı miktarı gösterilmektedir. Bu deney Bölüm 3.4.3.1. de anlatılan kalorimetre kabı ile gerçekleştirilmiş ve deney sırasında 15 dakika ara ile ölçümler alınmıştır. Elde edilen sonuçlar her iki saatte bir ölçümü gösterecek şekilde özetlenerek aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.13: Çimento hamuru hidratasyonu sırasında salınan toplam hidratasyon ısısı (kJ/kg)

Numune kodu	C1HM	C2HM	C3HM	C1SAHM	C2SAHM	C3SAHM
Zaman (saat)						
0	0	0	0	0	0	0
2	7,7	6,0	8,1	3,8	3,3	2,9
4	34,1	29,7	37,9	10,5	9,8	7,2
6	116,1	105,1	144,6	33,8	43,6	21,2
8	153,6	145,8	160,1	128,2	119,6	114,7
10	165,7	159,5	166,8	146,9	128,9	129,5
12	171,5	166,0	171,2	153,4	133,8	135,4
14	175,0	169,9	174,7	156,3	136,4	138,2
16	177,6	172,5	177,3	157,7	138,2	140,0
18	180,0	174,2	180,1	158,4	139,2	140,9
20	182,4	175,7	182,5	158,2	139,9	141,8
22	184,4	176,8	184,5	158,1	140,6	142,6
24	185,9	179,1	186,4	157,7	141,3	143,0

SA içermeyen hamurlarda S/Ç=0,25, SA içeren hamurlarda ise S/Ç=0,20'dir.

Tablo 4.14 da verilen 28. gün hidratasyon ısıları deneyleri Bölüm 3.4.3.1. de anlatılan ASTM C186-98 ve TS 687 standardlarında belirtilen asitte çözünme esasına göre yapılmıştır. Sonuçlar aşağıda cal/g ve kj/kg olmak üzere iki farklı birimde gösterilmektedir.

Tablo 4.14: 28. Gün sonunda ölçülen hidratasyon ısıları.

Numune Kodu	28. Gün Hidratasyon Isısı (cal/g)	28. Gün Hidratasyon Isısı (kj/kg)
C1HM	58,6	245
C2HM	71,1	298
C3HM	86,9	364
C1SAHM	39,8	167
C2SAHM	38,3	160
C3SAHM	69,6	292

4.3. Civalı Porozimetre ile Mikroboşluk Deneyleri

Mikroboşluk deneyleri ile sertleşmiş numunelerde oluşmuş kılcal boşlukların inceliklerini, sürekliliğini, dağılımlarını, miktarlarını belirlemek amaçlanmıştır. C1, C2 ve C3 çimentoları ile üretilen, SA içeren ve içermeyen, 24 saat ve 28 gün yaşlarındaki sertleşmiş hamur numuneler üzerinde yapılan civalı porozimetre deneylerinin özet sonuçları Tablo 4.15, 4.16 ve 4.17 de verilmektedir. Bu tablolar tüm sonuçları içermemektedir. Elde edilen tüm deney sonuçları Ek A da (Tablo A1-TabloA16) ayrıca verilmiştir.

Deneylerin yürütüldüğü Poremaster 33 GT aygıtı uygulanan basınç değerini, o basınç değerinde basılabilen civa hacmini ölçmektedir. Bu iki değere dayanarak boşluk çapı D'yi ve çapa bağlı olarak civa hacmindeki değişimi ifade eden $dV/d(\log D)$ gibi bir büyüklüğü vermektedir. Aletin basınç gücü sınırlıdır, ve çapın minimum bir değere inmesinden sonra ve civa basılması olanaksızlaşınca basınç artamamaktadır. Bu değer numunedeki en küçük (minimum) kılcal çap olarak kabul edilmiştir. Porozimetre aygıtı deneye yaklaşık $0,17 \text{ N/mm}^2$ basınçla başlamakta ve kullanılan bilgisayar programına göre bu basınç değerindeki kılcal boru çapı 750-800 nm olarak verilmektedir.

Tablo 4.15: 28 günlük tam izole şartlarda (Tİ) saklanmış hamur numunelerde yapılan civalı porozimetre deneyleri (özet)

Numune Kodu	Uygulanan basınç (N/mm ²)	Nüfuz eden civa hacmi, V (cc/g)	Boşluk çapı, D (nm)	dV/d(logD)
C1HM	0,2	0,00000	7543	3,1310000
	38,8	0,00900	37,89	6,3590000
	118,7	0,01310	12,39	5,2830000
	219,8	0,02180	6,69	3,2900000
C2HM	0,2	0,00000	8178	0,0000100
	40,9	0,00320	35,95	0,0239200
	109,7	0,00500	13,4	1,0920000
	205,1	0,01510	7,17	3,2980000
C3HM	0,2	0,00000	8178	0,0000413
	42,5	0,01690	34,64	0,1176000
	161,4	0,02850	9,112	2,0000000
	227,1	0,03260	6,477	1,4360000
C1SAHM	0,2	0,00000	8009	0,0000109
	41,7	0,04880	35,31	2,5840000
	108,8	0,06570	13,52	0,6684000
	226,6	0,06800	6,491	0,6857000
C2SAHM	0,2	0,00000	7848	0,0000021
	45,3	0,00080	32,46	0,0077900
	113,7	0,00150	12,93	0,3469000
	212,1	0,00740	6,933	2,3670000
C3SAHM	0,2	0,00000	8354	0,0000000
	60,6	0,00170	24,26	0,0279000
	199,5	0,01250	7,374	2,106000
	223,7	0,01400	6,576	1,681000

Tablo 4.16: 24 saat tam izole şartlarda (Tİ) saklanmış hamur numunelerde yapılan civalı porozimetre deneyleri (özet)

Numune Kodu	Uygulanan basınç (N/mm ²)	Nüfuz eden civa hacmi, V (cc/g)	Boşluk çapı, D (nm)	dV/d(logD)
C1HM	0,2	0	8178	0,0000026
	55,1	0,0098	26,68	0,1879000
	143,0	0,0251	10,28	1,9060000
	209,0	0,0302	7,037	1,3890000
C2HM	0,2	0	7543	0,0000299
	76,4	0,0377	19,25	1,6780000
	194,7	0,0457	11,69	0,5840000
	210,6	0,0467	6,983	0,0000000
C3HM	0,2	0	8009	0,0000000
	77,9	0,0243	18,87	1,2060000
	127,5	0,0309	11,54	1,6470000
	211,6	0,033	6,95	0,2696000
C1SAHM	0,2	0	7128	0,0000061
	49,3	0,0017	29,86	0,0354200
	174,8	0,0132	8,413	2,3080000
	220,9	0,0172	6,657	2,0810000
C2SAHM	0,2	0	8178	0,0000328
	36,5	0,0005	40,33	0,0000000
	192,6	0,0131	7,635	3,6370000
	216,5	0,016	6,795	2,8790000
C3SAHM	0,2	0	7000	0,0000032
	60,5	0,0034	24,3	0,2485000
	135,2	0,0139	10,88	1,4100000
	223,5	0,017	6,581	0,0000000

Tablo 4.17: 24 saat su altında havadan izole şartarda (Hİ) saklanmış hamur numunelerde yapılan civalı porozimetre deney sonuçları (özet)

Numune Kodu	Uygulanan basınç (N/mm ²)	Nüfuz eden civa hacmi, V (cc/g)	Boşluk çapı, D (nm)	dV/d(logD)
C1HM	0,2	0	8354	0,0000047
	80,7	0,0099	18,22	1,1930000
	150,3	0,016	9,784	0,5402000
	217,4	0,0177	6,764	1,2100000
C3HM	0,2	0	8354	0,0000083
	60,3	0,0097	24,37	0,4513000
	134,7	0,0192	10,92	1,1350000
	222,2	0,0232	6,619	1,0840000
C1SAHM	0,2	0	8178	0,0000017
	70,4	0,0008	20,88	0,0182100
	196,0	0,0068	7,504	1,2240000
	218,6	0,0076	6,727	0,6564000
C3SAHM	0,2	0	8009	0,0000000
	48,5	0	30,33	0,0000000
	150,4	0,0056	9,782	1,8490000
	217,4	0,01	6,766	1,3900000

4.4. Otojen Rötire Deneyleri Sonuçları

4.4.1. Erken yaş tam izole (Tİ) ortamda hacimsel fiziko-kimyasal otojen rötire (FKOR) deney sonuçları

Tam izole (Tİ) ortamda yapılan (FKOR) deneyleri Bölüm 3.4.2. de tarif edildiği gibi uygulanmış ve deney sonucunda birim çimento hacmi için zamanın fonksiyonu olarak numunenin dışsal hacmindeki büzülme elde edilmiştir. Deney sırasında her 15 dakika için bir ölçüm yapılmıştır; elde edilen sonuçlar burada her iki saatte bir veri olacak şekilde özetlenerek verilmiştir. Genellikle hacimsel rötire değerleri bazı araştırmacılar tarafından mm³/g-çimento veya mm³/100g-çimento şeklinde verilmektedir. Tablo 4.18 de lineer değerlere geçebilmek üzere rötire değerleri mm³/mm³ çimento hamuru birimine dönüştürülmüş ve % olarak ifade edilmiştir. Bununla birlikte mm³/g.çimento'ya göre de çizimler yapılmış ve Tablo A.1 de sunulmuştur.

Tablo 4.18: Tam izole (Tİ) ortamda saklanan hamur numunelerde ölçülen rötre sonuçları (mm^3/m^3 , %)

Numune kodu	C1HM	C2HM	C3HM	C1SAHM	C2SAHM	C3SAHM
Zaman (saat)						
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,423	0,448	0,289	0,480	0,499	0,316
4	0,597	0,596	0,494	0,633	0,633	0,472
6	0,725	0,633	0,755	0,867	0,780	0,575
8	0,769	0,650	0,915	1,092	1,056	0,798
10	0,812	0,742	0,997	1,179	1,205	1,061
12	0,848	0,867	1,091	1,191	1,263	1,155
14	0,865	0,898	1,113	1,180	1,273	1,178
16	0,871	0,915	1,131	1,168	1,267	1,166
18	0,879	0,927	1,152	1,168	1,259	1,159
20	0,899	0,934	1,170	1,171	1,252	1,161
22	0,923	0,945	1,197	1,176	1,254	1,168
24	0,940	0,957	1,220	1,182	1,254	1,179

4.4.2. Kimyasal otojen rötre (KOR) deneyi sonuçları

Su vasıtası ile havadan izole (Hİ) numunelerin otojen rötrelerine Kimyasal Otojen Rötre (KOR) adını vermiştik. Bunların rötre değerleri de FKOR değerleri gibi mm^3/mm^3 (%) olarak Tablo 4.19 de sunulmuştur. Rötrelerin $\text{mm}^3/\text{g.çimento}$ veya $\text{mm}^3/100\text{g. çimento}$ şeklindeki ifadeleri ise Tablo A.2 de ayrıca verilmiştir.

Tablo 4.19: Hİ koşulunda ölçülen kimyasal otojen rötre deneyi sonuçları (mm^3/m^3 , %)

Numune kodu	Toplam Kimyasal Rötre (%)					
	C1HM	C2HM	C3HM	C1SAHM	C2SAHM	C3SAHM
Zaman (saat)						
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,34	0,44	0,10	0,18	0,25	0,01
4	0,69	0,72	0,33	0,25	0,29	0,09
6	1,22	1,21	0,82	0,37	0,39	0,24
8	1,73	1,72	1,37	0,64	0,51	0,67
10	2,19	2,21	1,86	1,08	0,80	1,35
12	2,59	2,63	2,27	1,55	1,29	2,01
14	2,89	2,96	2,57	1,98	1,84	2,53
16	3,13	3,23	2,82	2,31	2,43	2,89
18	3,33	3,45	3,02	2,54	2,84	3,13
20	3,52	3,65	3,22	2,70	3,15	3,30
22	3,69	3,81	3,39	2,85	3,36	3,45
24	3,84	3,98	3,55	2,99	3,55	3,58

4.4.3. İleri yaş lineer otojen rötire ölçümleri

4.4.3.1. Deformetre ile lineer deney sonuçları

Lineer ölçümlerde deformetre (demec) ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Ayrıca fotogrametrik ölçülerle karşılaştırma yapabilmek için iki yöntem ölçüm sonuçları Bölüm 4.5 de Tablo 4.27, 4.28, 4.29 da verilmiştir. Tablo 4.20 tam izole ortamda saklanan ve SA içermeyen hamurların, Tablo 4.21 de tam izole ortamda saklanan SA içeren hamurların lineer otojen rötire deney sonuçlarını içermektedir.

Tablo 4.20: Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içermeyen hamurların lineer otojen rötire değerleri ($\mu\text{m}/\text{m}$, 10^{-6}).

C1HM		C2HM		C3HM	
Yaş (gün)	Lineer otojen rötire (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötire (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötire (μD)
0	0	0	0	0	0
1	820	1	410	1	970
2	865	2	560	4	1175
3	870	5	775	5	1240
4	880	6	775	6	1250
5	895	7	873	8	1305
8	965	9	920	13	1405
9	950	14	1015	16	1525
10	1000	17	1085	26	1685
12	1005	27	1120	28	1755
17	1025	28	1140	30	1820
20	1075	31	1200	35	1825
28	1120	36	1160	40	1862
30	1135	41	1223	44	1875
34	1230	45	1210	54	1842
39	1205	55	1233	57	1847
44	1220	58	1258	71	1847
48	1225	72	1243	100	1848
58	1165	100	1255		
61	1140				
75	1140				
100	1140				

Tablo 4.21: Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içeren hamurların lineer otojen rötre değerleri ($\mu\text{m/m}$, 10^{-6}).

C1SAHM		C2SAHM		C3SAHM	
Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)
0	0	0	0	0	0
1	2113	1	2038	1	2183
2	2150	2	2155	4	2415
3	2193	5	2290	5	2418
4	2195	6	2320	6	2488
5	2213	7	2380	8	2535
8	2233	9	2400	13	2618
9	2203	14	2440	16	2723
10	2280	17	2515	26	2875
12	2228	27	2718	28	2875
17	2228	28	2750	30	2875
20	2290	31	2788	35	2875
28	2300	36	2868	40	2875
30	2300	41	2975	44	2875
34	2400	45	2978	54	2835
39	2385	55	2960	57	2835
44	2405	58	3040	71	2835
48	2395	72	3048	100	2835
58	2345	100	3050		
61	2325				
75	2325				
100	2325				

Tablo 4.22 de tam izole ortamda saklanan ve SA içermeyen betonların, Tablo 4.23 da tam izole ortamda saklanan SA içeren betonların lineer otojen rötre deney sonuçları gösterilmektedir. Tablo 4.24 ve 4.25 ise bu koşullarda saklanan harç numunelerin lineer otojen rötre deney sonuçlarını içermektedir.

Tablo 4.22: Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içermeyen betonların lineer otojen rötre değerleri ($\mu\text{m/m}$, 10^{-6}).

C1B		C2B		C3B	
Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)
1	0	1	0	1	0
3	60	3	80	3	0
8	176	8	120	8	75
13	260	13	180	13	95
17	266	17	180	17	95
27	320	27	220	27	135
28	360	28	220	28	135
30	382	30	220	30	135
44	380	44	290	44	185
75	385	75	303	75	210
100	390	100	310	100	215

Tablo 4.23: Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içeren betonların lineer otojen rötre değerleri ($\mu\text{m/m}$, 10^{-6}).

C1SAB		C2SAB		C3SAB	
Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)
1	968	1	449	1	241
3	1025	3	482	3	278
8	1054	8	551	8	295
13	1051	13	562	13	307
17	1051	17	583	17	321
27	1098	27	639	27	341
28	1103	28	648	28	341
30	1103	30	659	30	341
44	1179	44	712	44	341
75	1121	75	731	75	336
100	1121	100	732	100	336

Tablo 4.24: Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içermeyen harçların lineer otojen rötre değerleri ($\mu\text{m/m}$, 10^{-6}).

C1HÇ		C2HÇ		C3HÇ	
Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)
1	0	1	0	2	0
2	280	2	235	3	130
8	290	6	470	4	260
12	355	11	492	9	350
17	395	16	565	13	460
22	420	20	603	18	450
26	437,5	28	640	23	532,5
28	430	30	645	27	517,5
36	412,5	33	670	28	517,5
39	427,5	47	693	37	507,5
53	442,5	75	700	40	510
75	450	100	710	54	517,5
100	455			75	520
				100	520

Tablo 4.25: Tam izole ortamda (Tİ) saklanan ve SA içeren harçların lineer otojen rötre değerleri ($\mu\text{m/m}$, 10^{-6}).

C1SAHÇ		C2SAHÇ		C3SAHÇ	
Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)	Yaş (gün)	Lineer otojen rötre (μD)
1	1207	1	109	2	543
2	1238	2	245	3	574
8	1305	6	441	4	605
12	1301	11	573	9	637
17	1301	16	724	13	660
22	1352	20	734	18	688
26	1357	28	774	23	729
28	1360	30	829	27	729
36	1441	33	792	28	729
39	1429	47	838	37	729
53	1396	75	867	40	729
75	1380	100	879	54	729
100	1380			75	718
				100	718

4.5. Fotogrametrik Yöntemle Ölçülen Lineer Otojen Rötire Değerleri

Deformetre (DEMEC) yardımıyla ölçülen lineer şekil değiştirmelerin doğruluğunu kontrol etmek ve uygulanan izolasyon yönteminin ne derece başarılı olduğunu kanıtlamak amacıyla 3.4.5 bölümünde açıklanan mikrofotogrametrik ölçümler, deformetre ölçümlerinin paralelinde yürütülmüştür. Bu deneyler ana deneylerden ayrı olarak üretilen hamurlar üzerinde 120 dakika boyunca sürdürülmüştür.

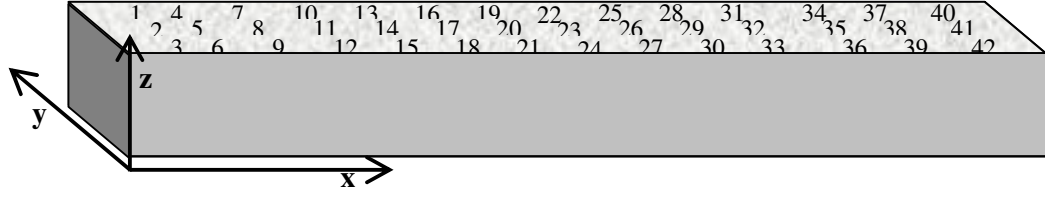
Her numune üzerine 42 adet fotogrametrik algılamayı sağlayan ve hedef adı verilen ögeler yapıştırılmıştır Şekil 4.5. bu ögelerin 3 eksendeki (x,y,z) koordinatları dijital sistemle izlenmekte ve bunlarda meydana gelen deformasyonlara göre koordinatların yeni değerleri belirlenmektedir. Çok duyarlı olarak saptanan bu x,y,z, koordinatları her üç yöndeki deplasmanların bulunmasına imkan vermektedir. Tablo 4.26’ da bu koordinat değerleri 0,25 S/Ç oranlı çimento hamurunun başlangıç ve 24 saat sonundaki 2,11,21,29,38 no’lu hedeflerine ait olanlar şeklinde kısıtlı biçimde gösterilmiştir.

X yönündeki koordinatlardan itibaren hesaplanan lineer otojen rötire değerleri ise 4.27, 4.28., 4.29 sayılı tablolarda deformetre ölçüm değerleri ile birlikte sunuldu. Böylece iki ölçüm sistemi arasındaki yaklaşıklık saptandı.

Fotogrametrik ölçümde deformetre ile yapılan ölçümdeki ölçü boyuna eşit noktalardan elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

Tablo 4.26: S/Ç oranları 0.25 olan SA içermeyen çimento hamuru numune üzerindeki noktaların fotogrametrik ölçümle belirlenmiş koordinatları

Eksen Nokta no	Karışım anı (0 saat)			24 saat		
	x	Y	Z	x	y	Z
2	2245,3411	901,6154	4591,0344	2245,1410	901,4745	4591,3925
11	2198,0443	900,0516	4582,5326	2197,9519	899,9337	4582,8964
20	2148,8125	903,3359	4574,2986	2148,8160	903,2351	4574,6627
29	2103,3838	902,0187	4566,6466	2103,4692	901,9129	4567,0075
38	2061,5080	904,0806	4559,7776	2061,6823	903,9875	4560,0968



Şekil 4.5: Hedef noktaların numune üzerindeki yerleşimleri

Tablo 4.27: 0,20 S/Ç oranlı ve tam izole ortamda tutulan hamurlar için deformetre ve fotogrametrik yöntemle elde edilen lineer otojen rötre değerleri.

Zaman (saat:dak)	Deformetre ölçümü (μD)	Fotogrametrik ölçüm (μD)
0:00	-	-
1:20	-	-
2:20	0	0
4:00	67	73
7:20	159	162
9:00	445	480
10:00	537	545
24:00	1385	1410
40:00	1517	1470
72:00	1787	1810
96:00	2037	2055
120:00	2247	2270

Tablo 4.28: 0,25 S/Ç oranlı ve tam izole ortamda tutulan hamurlar için deformetre ve fotogrametrik yöntemle elde edilen lineer otojen rötre değerleri.

Zaman (saat:dak)	Deformetre ölçümü (μD)	Fotogrametrik ölçüm (μD)
0:00	-	-
1:15	-	-
3:00	0	0
3:30	63	65
6:00	284	255
9:30	583	450
26:30	787	815
46:30	900	941
72:00	1207	1250
96:00	1310	1364
120:00	1420	1522

Tablo 4.29: 0,30 S/Ç oranlı ve tam izole ortamda tutulan hamurlar için deformetre ve fotogrametrik yöntemle elde edilen lineer otojen rötre değerleri.

Zaman (saat:dak)	Deformetre ölçümü (μD)	Fotogrametrik ölçüm (μD)
0:00	-	-
1:15	-	-
3:30	-	-
6:00	0	0
7:00	102	77
21:00	360	427
50:00	764	863
72:00	950	1050
96:00	1090	1203
120:00	1185	1312

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu araştırmada otojen rötrenin oluşmasında ve gelişmesinde etkin olan çimento bileşiminin ve özellikle çözünen alkali içeriğinin, çimento inceliğinin ve yüksek akışkanlaştırıcı katkının işlevleri ele alındı. Otojen rötire ölçümünde genellikle iki farklı yöntemden yararlanıldığı açıklanmıştı. Bunlar; hava ve suya tamamen kapalı bir ortamdaki çimento hamurunun hacimsel otojen rötresinin ölçülmesi diğeri üzeri su ile dolu havaya karşı izole edilmiş kapta aynı malzemenin Le Chatelier yöntemine göre dışsal rötresinin ölçülmesidir. Otojen rötrenin asıl kaynağı çimento hamur fazı olmakla beraber pratik açıdan harç ve betonlarda da izlenmesi gereklidir. Bu sebeple, çalışmada da hamur, harç ve mikrobetonlar üzerinde de inceleme yürütülmüştür. Otojen rötrenin en anlamlı olduğu süre suyla karışımı izleyen ilk 24 ila 48 saattir. Ancak otojen rötire hidrasyon sürdüğü sürece devam edebilmektedir. Doğal olarak kuruma rötresinden ve termik rötirelerden bağımsız kılabilmek amacıyla bu rötirelerin ölçümlerinin dış ortamdaki izole edilmiş numuneler üzerinde sabit sıcaklık altında yapılması zorunludur. Bu açıklamaların ışığında otojen rötire deneylerini deney teknikleri, numune türleri, ve zaman açısından sınıflandırmak uygundur. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde izlenecek yöntem aşağıda gösterildiği şekilde uygulandı.

- i) Hamurlar üzerinde kısa süreli hacimsel otojen rötire deneyleri
 - a- Hava ve suya kapalı ortamda (Tam izole, Tİ)
 - b- Suyla örtülü havaya kapalı ortamda (Havadan izole, Hİ)
- ii) Hamur, harç ve mikrobetonlar üzerinde tam izole ortamda uzun süreli doğrusal otojen rötire ölçüleri.

Bu deneylerin incelenmesi sırasında gözlenen bulguları açıklığa kavuşturmak üzere yapılan yardımcı deneylerin sonuçlarına doğal olarak başvuruldu; bunlar;

- Hidratasyon ısılarının gelişimi

- Hidratasyon süresince oluşan hidratasyon dereceleri
- Hidratasyon sonucunda meydana gelen mikroboşlukların incelenmesi
- Uzun süre otojen rötre deneylerinde deformetre ile elde edilen rötre değerlerinin kontrolü ve lineer-hacimsel FKOR dönüşümlerini elde etmek amacıyla yapılan fotogrametrik ölçüler.

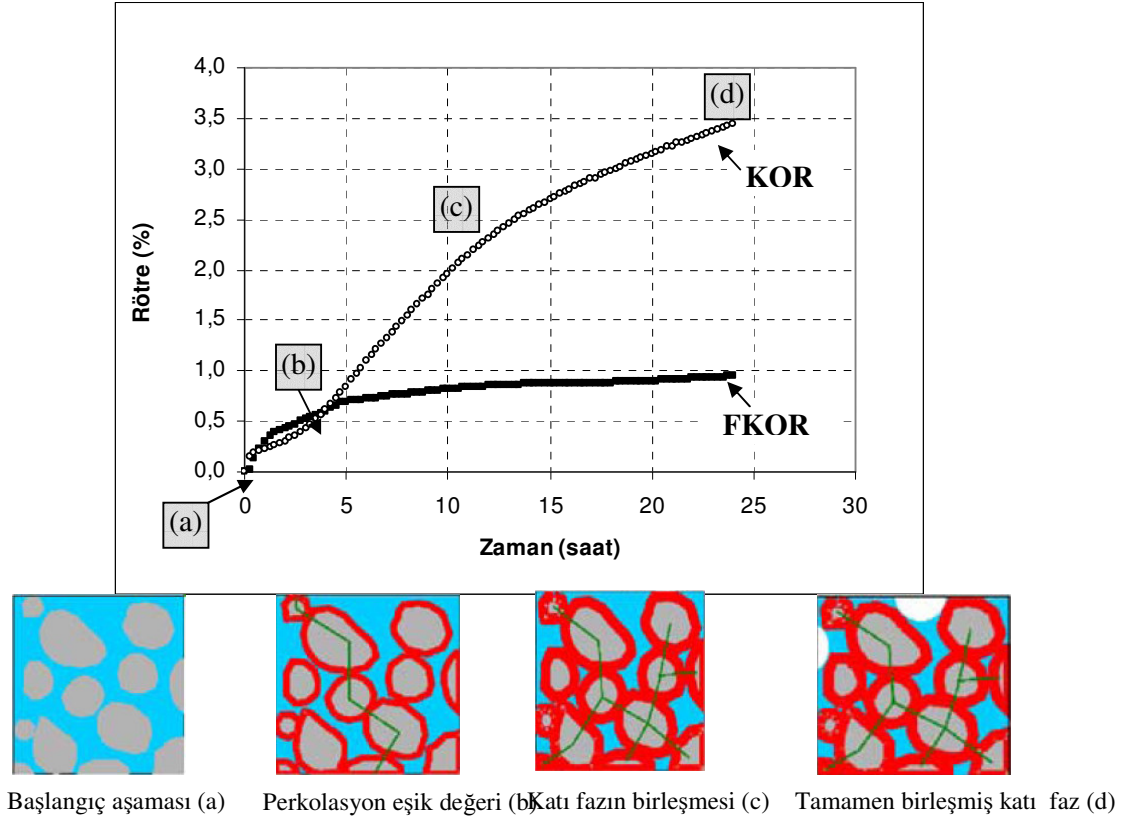
Otojen rötre deyiminin tanımlanmasında gözlenen karmaşa nedeniyle su ve havadan izole edilmiş ortamda yapılan deneyler fizikokimyasal otojen rötre (FKOR), su ile temas halinde fakat havadan izole edilerek yapılan deneyler kimyasal otojen rötre (KOR) olarak benimsenmiştir. FKOR bu rötrelerin dışsal hacme daha büyük oranda yansıyan kısmı olduğundan ve ilk saatlerde meydana gelen rötrenin büyük kısmı FKOR olduğundan değerlendirme bölümünde FKOR sonuçlarına ağırlık verilmiştir. Rötre değerleri grafiklerde (%) olarak işlenmiştir. Ancak pekçok yayında bu değerler $\text{mm}^3/\text{g-çimento}$ veya $\text{ml}/100\text{g-çimento}$ şeklinde sunulmaktadır. Bu birime ($\text{mm}^3/\text{g-çimento}$) göre çizilen rötre grafikleri Ek A' da Şekil A.1 ve A.2 de verilmiştir.

5.1. Hamurlar Üzerindeki Kısa Süreli Otojen Rötre Deneyleri

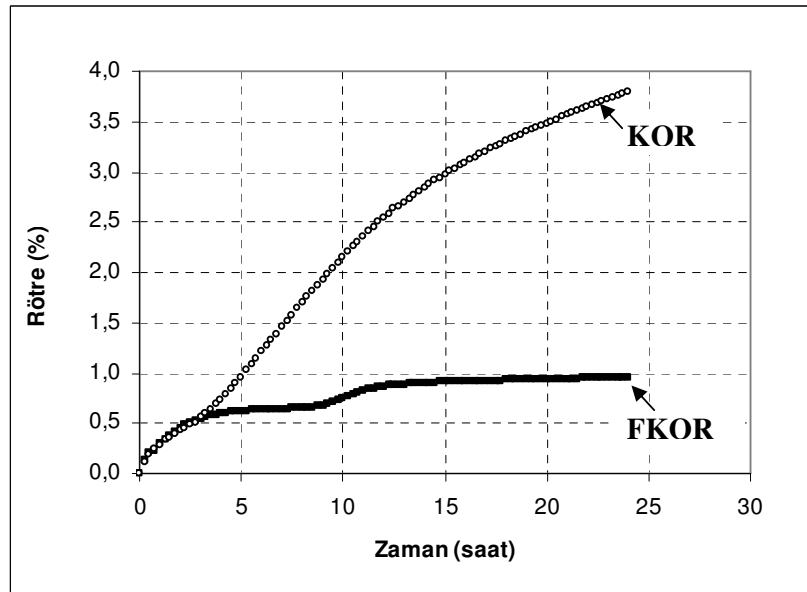
Bu deneyler iki açıdan ele alındı. İlk olarak tam izole ortamda (Tİ) yürütülen deneyler ve su ile kaplı havadan izole (Hİ) ortamda yürütülen deneyler incelendi. Bu deneyler FKOR ve KOR sonuçlarını vermiştir. Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3, SA içermeyen C1, C2 ve C3 çimento hamurlarının ilk 24 saat zarfında yaptıkları FKOR ve KOR rötrelerini göstermektedir.

Hidratasyonun çok erken aşaması (ilk 10 saat) Barcelo tarafından incelenmiştir [Barcelo 2001] Barcelo'nun hidratasyon modeline göre ilk 2 saat sonunda perkolasyon eşik değerine (suyun süzülebilmeye başladığı değer yani taneciklerin birbirlerine temas etmeye başladığı değer) varılmaktadır. 4 saat sonunda katı faz birleşmekte, 7 saat sonunda ise tam birleşmiş katı faz oluşmaktadır. Şekil 5.1 de C1 hamurunun hidratasyona bağlı FKOR ve KOR gelişimi bu anlayışa göre a,b,c,d aşamalarına ayrılmıştır.

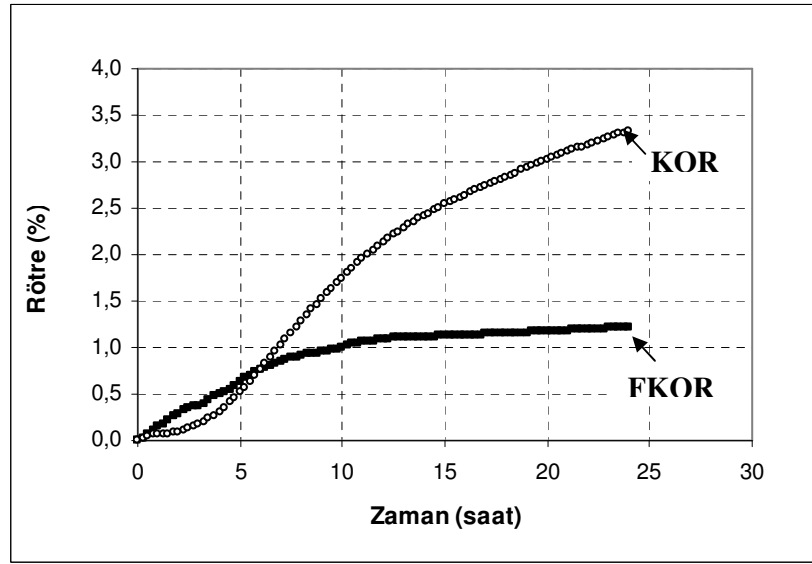
5.1, 5.2, 5.3 şekilleri FKOR ve KOR'nin davranışları bakımından incelendiğinde, katı fazın birleşmesine (4 saat, c aşaması) kadar geçen sürede FKOR'in artışındaki eğri kendine özgü dış bükey bir formdadır. Hİ ortamında saklanan hamur numunelerinden sadece C2 çimentosu hamuru bu eğri şekline uymaktadır. C1 ve C3 ise iç bükey bir forma sahiptirler. Şekil 5.4, 5.5, ve 5.6 da SA içeren ve daha küçük S/Ç oranı ile üretilen hamurlarda bu farklı davranış (iç bükeylik) daha açık ve seçik bir şekil almaktadır. Bu bulgu su altında izole edilmiş (Hİ) numunelerde kendiliğinden kurumaya bağlı FKOR'nin meydana gelmediğini ortaya koymaktadır. Şekillerden de anlaşılacağı gibi FKOR ilk saatlerde dış bükey bir şekil almaktadır. Aİtcin'in ifade ettiği gibi yüzeydeki su dışa açık ve geniş kılcalları doldurarak ince kılcallardaki suyun çekilmesini ve büzülme kuvvetlerinin doğmasını önlemektedir, bu sırada oluşan büzülme “katı hacmin kimyasal sıkışması=chemical contraction of solid volume” olarak adlandırılabilir. Nitekim çalışmamızda bu büzülmeyi Kimyasal Otojen Rötire (KOR) olarak nitelememizin bir nedeni budur. C2 hamurunda FKOR'e benzer olan davranışın sebebi bu çimentonun bileşiminden kaynaklanan bir durum olabilir. FKOR ve KOR'nin başlangıçtaki farklılığının SA içeren ve S/Ç oranı düşük olan çimentolarda daha belirgin meydana gelişi de dikkat çekicidir. SA'nın katı taneleri birbirinden uzaklaştırması (elektiriksel itme, sterik öteleme) suyun boşluklara girmesini kolaylaştıran bir faktör olarak kabul edilebilir. Böylece fizikokimyasal otojen rötire oluşumu önlenmiş olmaktadır.



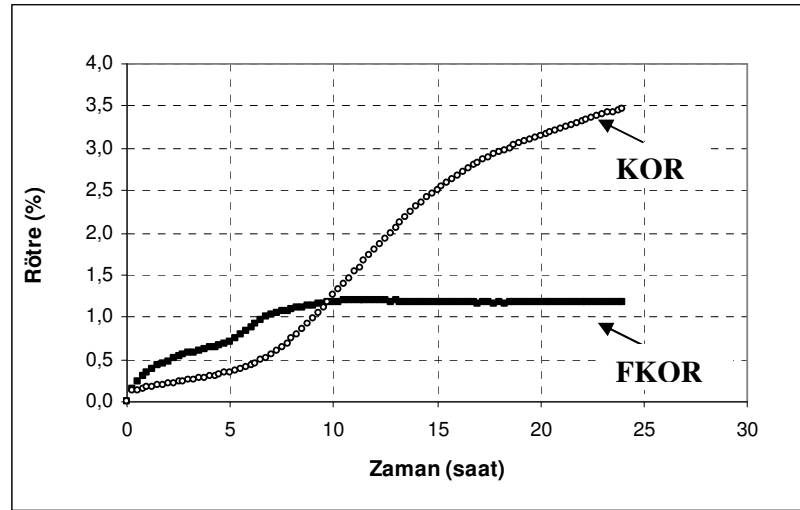
Şekil 5.1: SA içermeyen C1 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi



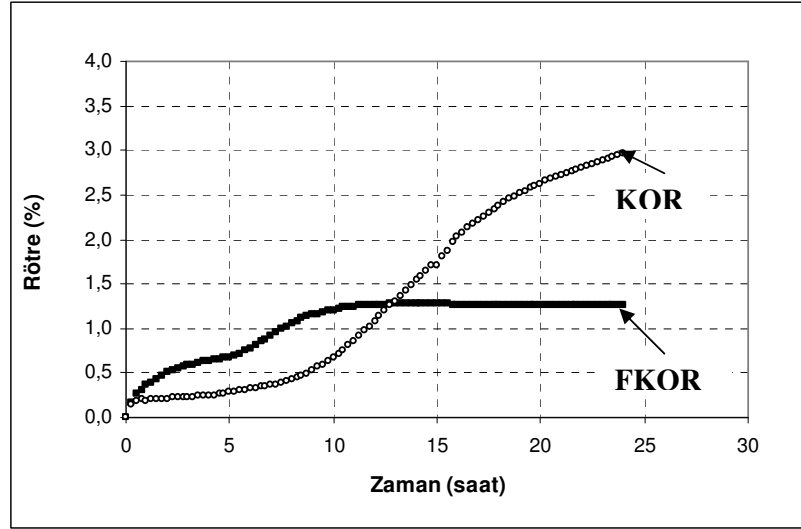
Şekil 5.2: SA içermeyen C2 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi



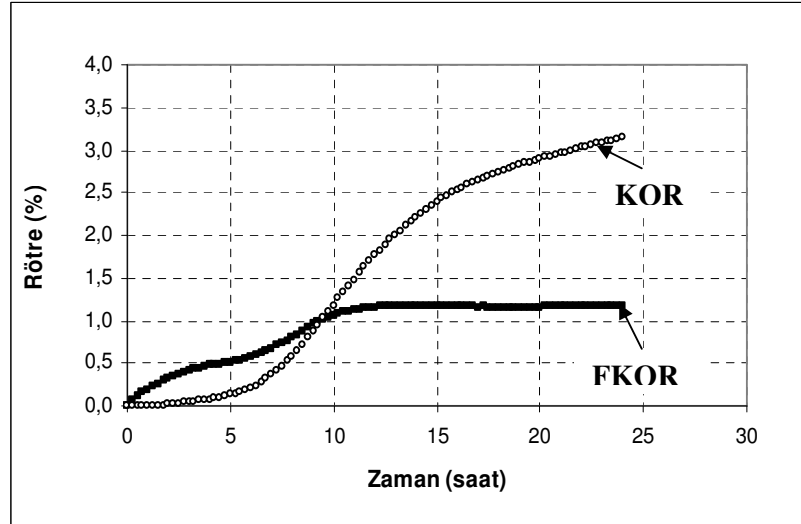
Şekil 5.3: SA içermeyen C3 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi



Şekil 5.4: SA içeren C1 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi

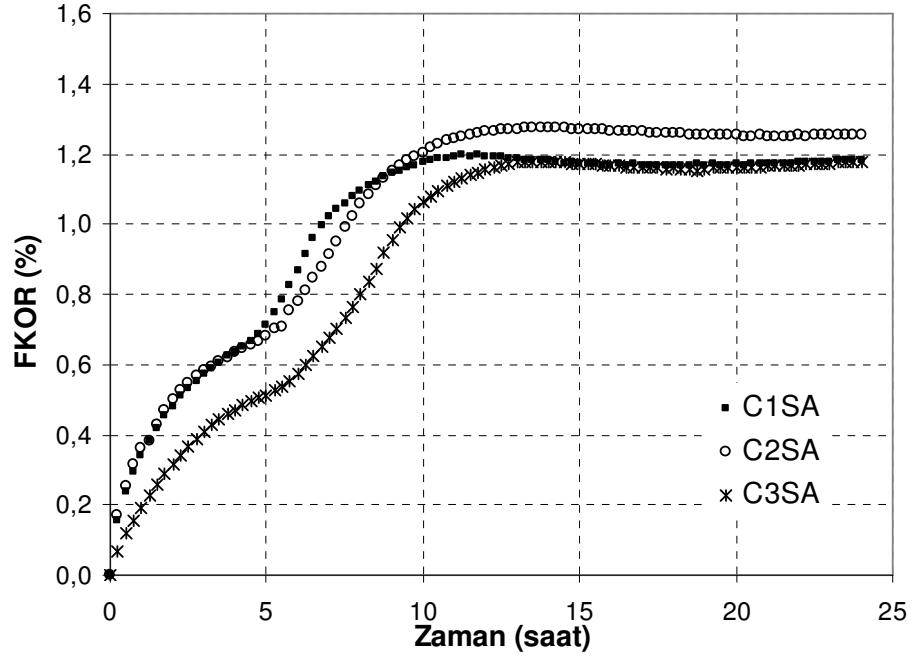


Şekil 5.5: SA içeren C2  imentosu KOR ve FKOR gelişimi

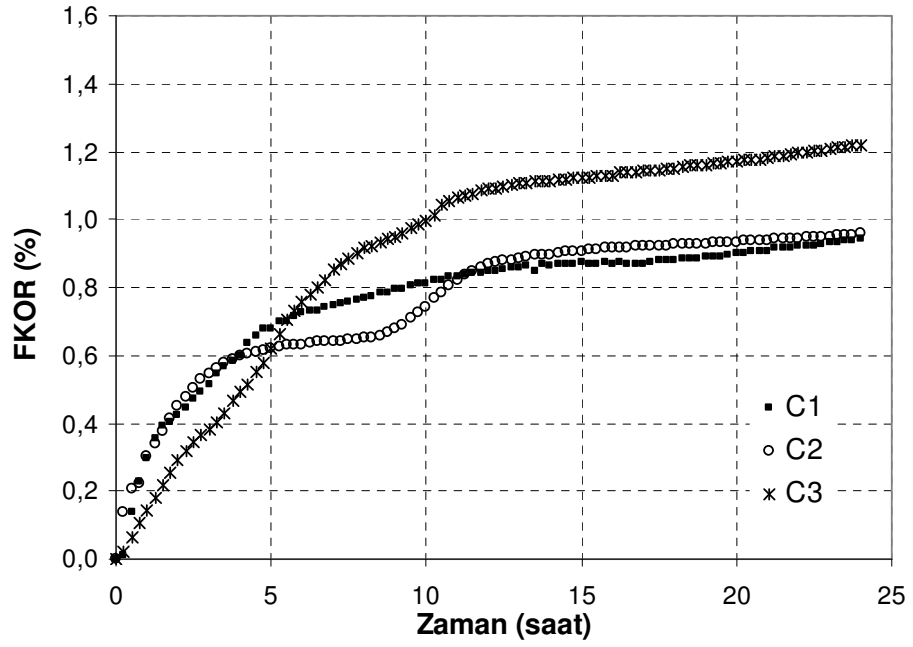


Şekil 5.6: SA içeren C3  imentosu KOR ve FKOR gelişimi

Otojen rötrenin düşük S/  oranlı yüksek performanslı betonlarda ortaya çıkan çarpıcı ve en çok tartışılan bileşeni FKOR'dir. Bu bölümün başında KOR ile birlikte ele alınan FKOR'nin temel parametrelerini daha yakından irdelemek üzere bunların FKOR-Zaman grafikleri SA içeren hamur numuneler için daha detaylı biçimde Şekil 5.7 de ve SA içermeyen hamurlar için Şekil 5.8'de bir arada çizildi.



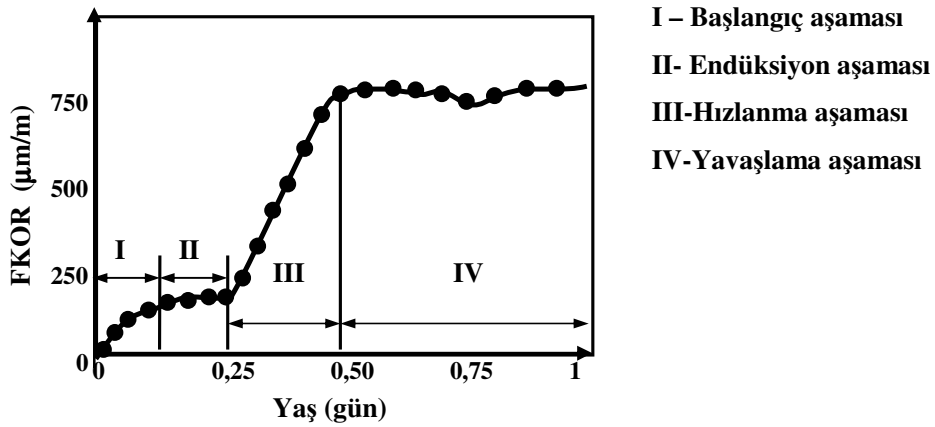
Şekil 5.7: SA içeren çimento hamurlarında FKOR gelişimi



Şekil 5.8: SA içermeyen çimento hamurlarında FKOR gelişimi

SA katkılı C1, C2, C3 çimento hamurlarında davranışlar birbirine yakındır. En ilginç husus beşinci saate kadar hızı azalan türde rötreler olmakta, beş ve onuncu saatler arasında lineer sayılabilecek düzeyde daha hızla oluşan bir rötre artışı gözlenmekte fakat on saatten itibaren rötreler hemen hemen sabit bir değer almaktadır. Böylece FKOR gelişiminde 3 aşama olduğu görülmektedir.

Nawa FKOR'ı dört ana aşamada incelemiştir. Bunlara başlangıç aşaması, endüksiyon aşaması, hızlanma aşaması ve yavaşlama aşaması adlarını vermiştir. Bu aşamaları eğri üzerinde oluşan büküm noktaları yardımıyla ayırmıştır. Kullanılan SA miktarına göre endüksiyon aşaması ortaya çıkabilmektedir. Şekil 5.9. da Nawa'nın çalışmasından alınmış deney sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 5.9: Nawa ya ait deney sonuçları

Nawa ve ark. SA kullanıldığı takdirde C_3S 'in hidratasyonunun geciktiğini, buna bağlı olarak da endüksiyon aşamasının oluştuğunu ve bu aşamanın uzunluğunun katkı dozajıyla değiştiğini vurgulamışlardır (Nawa ve diğ., 2004). Bunun yanında Barcelo ve diğ., (2005) çalışmalarında SA kullanmamış ve herhangi bir endüksiyon döneminden bahsetmemişlerdir.

Bu endüksiyon aşamasını belirleyen büküm noktası bazı araştırmacılara göre (Garcia, 2001) priz başlangıcı ile priz sonu arasına denk gelirken, bazılarına Baroghel ve Bouny (2005) göre priz sonundan sonra ortaya çıkmaktadır. Justness (2000) ise değişik S/Ç oranlı hamurlar için değişik sonuçlar elde etmiş, belirgin bir ilişki kuramamıştır. Gerçek FKOR değerlerinin ilk büküm noktasının sonrasındaki

değerlerin dikkate alınmasıyla elde edilebileceğini savunan (**Baroghel ve Bouny, 2005**) araştırmacılar da vardır.

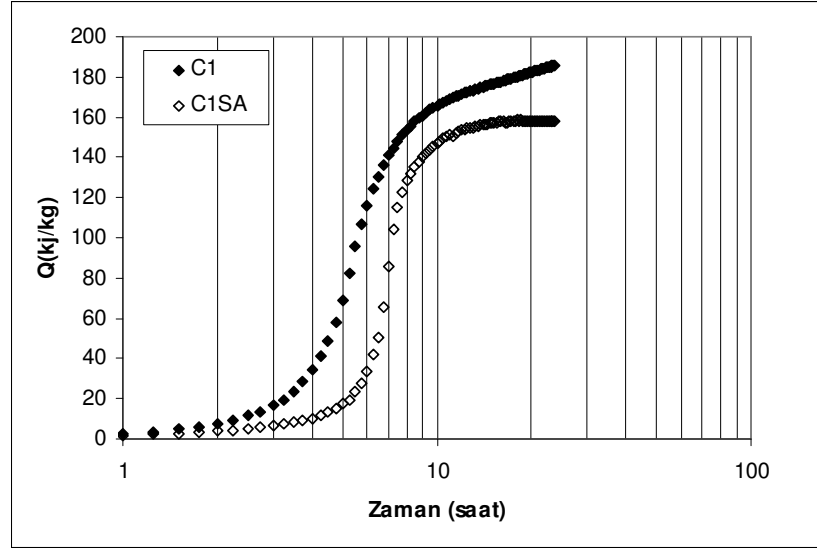
Bu çalışmadaki sonuçlara göre büküm noktalarının priz başlangıcı ve sonu ile belirgin bir ilişkisi elde edilememiş, fakat bu noktaların salıverilen hidrasyon ısısı grafiğinde birinci pik'e karşı geldiği saptanmıştır. Bazı araştırmacıların bahsettiği gibi bu noktadan (ilk büküm noktası) sonra ölçüme başlamak ise özellikle çok düşük S/Ç oranlı numunelerde başlangıçta olan FKOR'nin bir kısmının ihmal edilmesi anlamına gelir ve eksikliklerdir.

Çalışmamızdaki SA içeren, S/Ç oranı 0,20 olan tüm numunelerde üç ana aşama ortaya çıkmıştır. Endüksiyon aşaması sarıh olarak görülmemiştir. Başlangıç aşamasından doğrudan hızlanma aşamasına belirgin bir büküm noktası ile geçilmiştir. Bununla birlikte SA içermeyen ve S/Ç oranı 0,25 olan C1 ve C3 çimentosu ile üretilen numunelerde üç aşama olduğu görülse de bunlar SA içeren hamurlarda olduğu gibi net sınırlarla birbirlerinden ayrılmamışlardır. C2 çimentosu hamurunda ise bunların dışında bir gelişim belirlenmiştir. Bu hamur numunede Nawa'nın belirttiği endüksiyon aşaması da ortaya çıkmış ve toplam 4 aşama gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara dayanarak aşamaların sadece SA kullanılmasına bağlı düşünülmemesi gerektiği bunun yanında çimentonun kimyasal yapısı gibi diğer faktörlerin de gözönüne alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

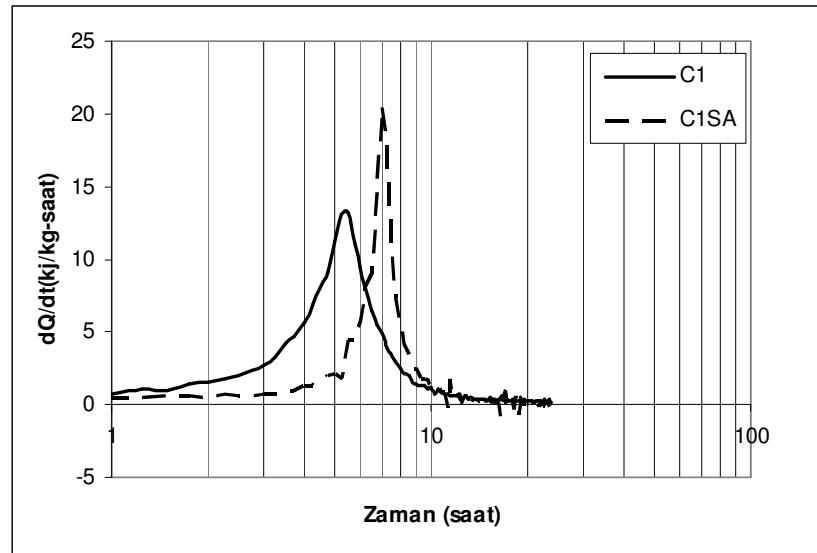
5.2. Hidratasyon Deneyleri, FKOR ve KOR ile İlişkileri

5.2.1. Hidratasyon ısısı deneyleri

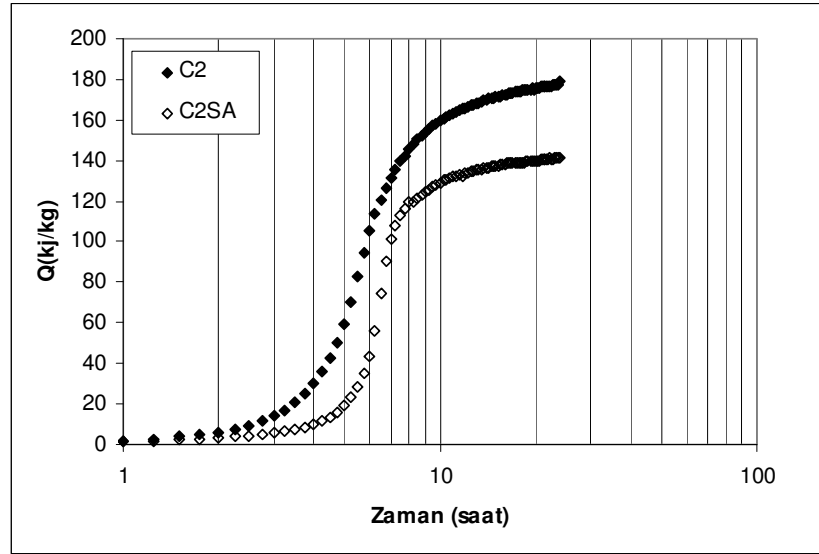
KOR ve FKOR'in hidrasyon süreci ile ilişkilerini ortaya çıkarmak üzere eklenik (cumulative) hidrasyon ısısı ve birim zamanda salıverilen ısı miktarları deney sonuçları Şekil 5.10-5.15 de verilmiştir.



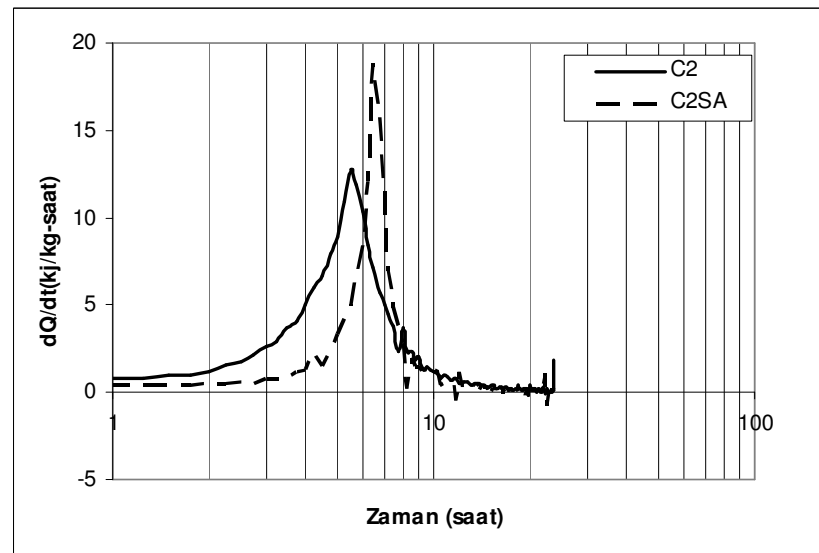
Şekil 5.10: C1 çimentosu toplam hidratasyon ısısı



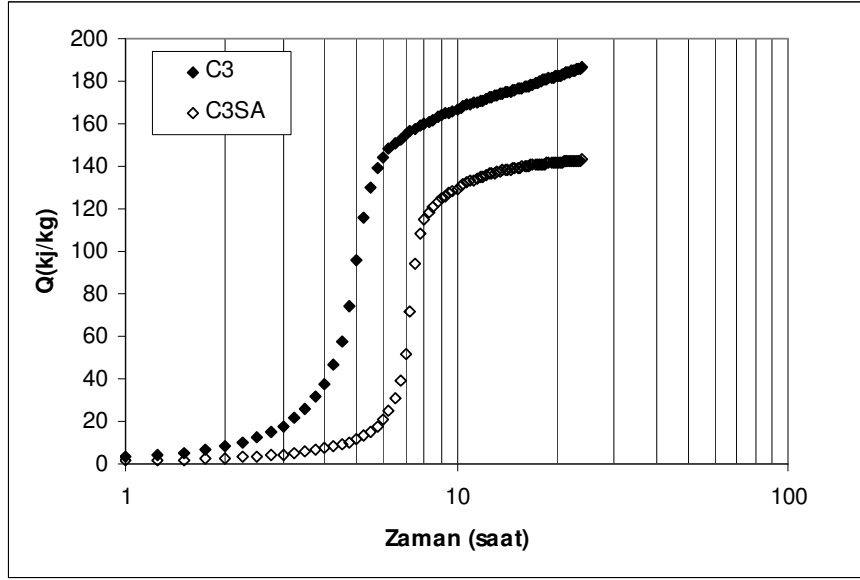
Şekil 5.11: C1 çimentosu birim zamanda salınan hidratasyon ısısı



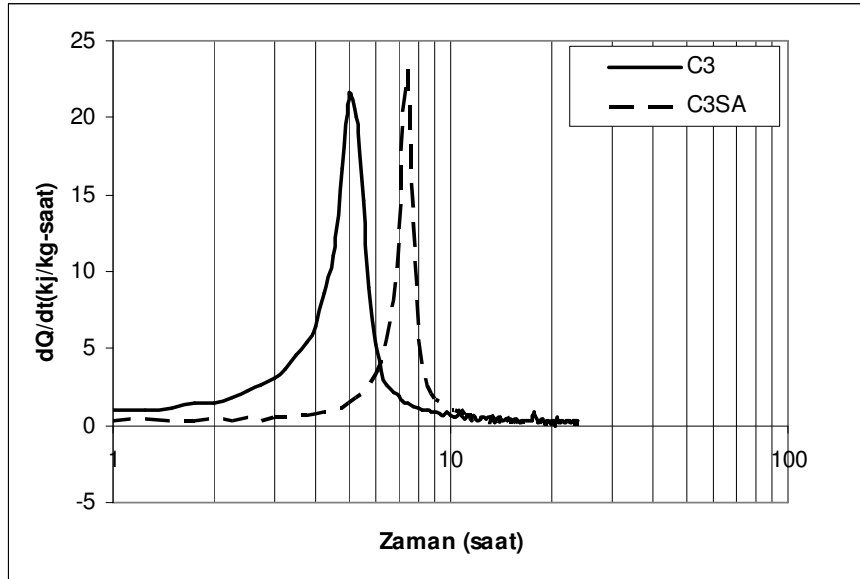
Şekil 5.12: C2 çimentosu toplam hidrasyon ısısı



Şekil 5.13: C2 çimentosu birim zamanda salınan hidrasyon ısısı



Şekil 5.14: C3 çimentosu toplam hidratasyon ısısı



Şekil 5.15: C3 çimentosu birim zamanda salınan hidratasyon ısısı

Hidratason ısısının eklenik yükselişi ve değeri hidratasyonun gerçekleşme sürecini ve oranını açıklar. Eklenik yükselişi SA içermeyen numunelerde 2. saatten SA içerenlerde ise 4. saatten itibaren (katı fazın birleşmesi, c aşaması) hızlanmakta ve 8. saatte kadar hızla fazlalaşmakta ancak daha sonra yavaşlamaktadır. 8. saat katı fazın tamamen birleşmesine raslar. Bu şekillerde ilginç olan bir diğer bulgu eklenik ısı değerlerinin SA katılımlı numunelerde daha düşük değerler aldığıdır. Birim zamanda

salıverilen enerjinin yeri ve miktarı da alkali içeriği, SA katılımı ve S/Ç oranı yönünden açıklayıcıdır. Tüm çimentoların hamurlarında SA katılımı, maksimum enerji salıverilmesini zaman olarak ileriye taşımaktadır. Eklenik enerjinin azalması ve daha geç sürelerle kayması, yani hidrasyon sürecinin gecikmesi ve değer kaybetmesinin, FKOR tipi bir büzülmenin oluşmasını kısıtlaması beklenebilir, zira bu rötrenin çok erken yaşlarda meydana geldiği ve hidrasyonla çok ince kılcal çatlakların teşekkülüne bağlı olduğu bilinmektedir. Hidrasyon ısısı üzerinde yapılan bu çalışmalar FKOR’i, azaltma yönünde SA katılımının olumlu olacağını gösterir. Ancak FKOR sonuçlarına bakıldığında SA içeren düşük S/Ç oranlı hamurların FKOR değerlerinin SA içermeyenlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Buradan hidrasyon ısısı artışının (hidrasyon gelişimi) FKOR’nin büyüklüğünü etkileyen tek etken olmadığı sonucu çıkarılabilir. Yukarıda belirtildiği gibi kılcal boşlukların çap ve miktarlarının etkileri de değerlendirilmelidir.

FKOR’in aşamaları iç yapıda oluşan fiziko-kimyasal değişimlerle açıklanabilir. Başlangıç aşamasında ortam henüz tam katı değildir, ancak hidrasyon başladığından yeni kılcal boşluklar oluşmakta ve bunlar hamurdaki ince borulardaki serbest suyu kısmen çekmeye başlarlar. Başlangıç aşamasında, suyu çekilen ince boruların oluşturduğu kendiliğinden kuruma gerilmelerinin etkisi zayıftır. İkinci aşamaya (hızlanma) geçildiğinde ortam setleşmiştir. İnce kılcal boruların sayısı artmıştır, çimento tanelerinin çektiği sular ince kılcal borulardaki menisküs çapları küçülmüş ve katı fazı daraltan büzme gerilmelerinin değerleri artmıştır. Artık büzülme sertleşmiş ortam üzerindedir ve lineer (doğrusal) olarak sabit hızla gelişir. İkinci aşama, ince borular içindeki suyun seviyelerinin azalması ve kuvvetle borular içinde tespit edilmesi nedeniyle sona erer. Üçüncü aşama (yavaşlama) hatta durma böylece oluşur. FKOR’nin etkili ana aşaması ikinci hızlanma aşamasıdır ve bu nedenle bazı araştırmacılar sadece bu aşamada kendiliğinden kuruma otojen rötresinin (FKOR) oluştuğunu kabul etmektedirler.

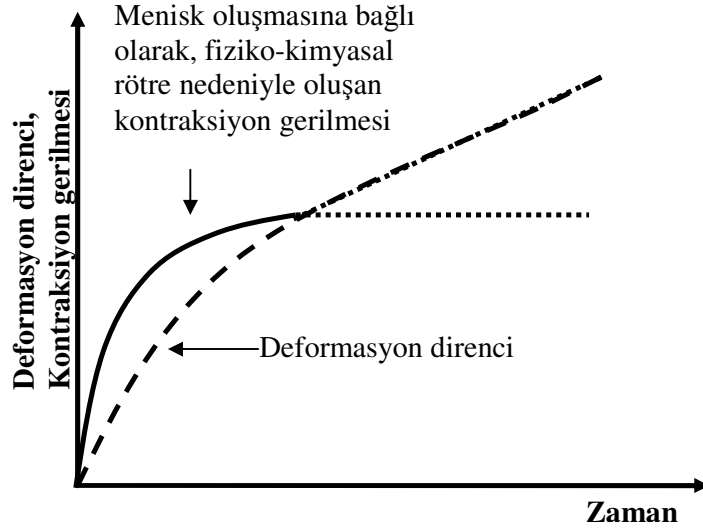
FKOR eğrisindeki başlangıç, hızlanma ve yavaşlama aşamalarının sınırlarını belirleyen büküm noktaları zaman (saat) ve oluşan rötne büyüklükleri (%) cinsinden Tablo 5.1’ de verildi.

Tablo 5.1: Rötire eğrisi kritik noktaları

Numune	1. Büküm		2. Büküm		Toplam 24 saat
	(saat)	(%)	(saat)	(%)	(%)
C1	1,25	0,352	13,50	0,849	0,940
C2	3,75	0,588	11,75	0,857	0,957
C3	2,50	0,347	10,25	1,011	1,219
C1SA	4,50	0,664	10,50	1,182	1,182
C2SA	5,00	0,679	11,00	1,251	1,250
C3SA	5,00	0,513	11,50	1,178	1,178

SA içermeyenlerde düşük alkalili C1 çimentosunda elde edilen 24 saatlik FKOR en düşük değerdedir. Yüksek alkalili çimentolarda ise FKOR en yüksek değeri almaktadır. Bu numunelerde 5 saat civarında FKOR'nin yavaşlamasıyla belirginleşen bir büküm noktası vardır. SA içeren hamurların FKOR leri, KOR sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, KOR ve FKOR arasında başlangıç bölgesinde belirgin bir farkın olduğu dikkati çekmektedir. FKOR değerleri tüm çimentolarda 10. saat civarına kadar KOR değerlerinden daha yüksek değerler almaktadır. Bu da başlangıç aşamasında ortaya çıkabilecek rötrenin çok büyük bir bölümünün fiziksel kaynaklı olduğunun kanıtıdır.

FKOR oluşumu aşağıdaki Şekil 5.15 de olduğu gibi şematize edilebilir. Çimentonun karışım anından itibaren, çimento hidratasyona başlar ve değişen bir hızla sertliği artar ve dayanım kazanır. Aynı zamanda menisklerdeki negatif gerilmeye bağlı olarak oluşan kontraksiyon gerilmeleri katı fazın büzülmesi yönünde çalışır. Bilindiği gibi başlangıçta katı ortamın deformasyona karşı gösterdiği direnç oldukça düşüktür. Ortaya çıkan kontraksiyon gerilmeleri bu dirence göre daha yüksek değerler alır; zıt yöndeki bu iki büyüklükten daha büyük olanı başlangıç aşamasında kontraksiyon gerilmeleri olduğundan, numune büyük bir hızla büzülür. Ancak bir süre sonra sertliğin gelişmesiyle birlikte numunenin deformasyona karşı gösterdiği direnç kontraksiyon kuvvetlerinden daha yüksek bir değer alır. Bu da FKOR'nin durmasının hidratasyon dışındaki bir diğer nedenidir.



Şekil 5.16: FKOR oluşumu

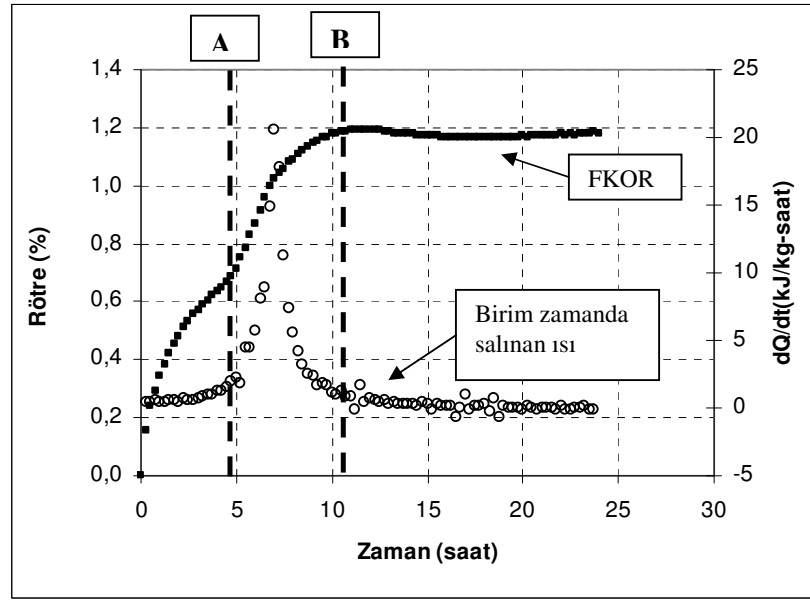
FKOR eğrisinin büküm noktalarının hidrasyonla olan ilişkisini incelemek amacıyla bu eğriler birim zamanda salıverilen ısı (BZSI) eğrileriyle birlikte ele alındı. Şekil 5.16, 5.17 ve 5.18 da sırasıyla SA içeren C1, C2 ve C3 çimentosu hamurlarının FKOR gelişimleri birim zamanda salıverilen ısı gelişimleriyle birlikte çizildi. Her üç grafikten de açıkça görüleceği gibi FKOR nin en büyük kısmı (hızlanma aşaması) birim zamanda salınan ısıнын en yüksek olduğu bölümde meydana gelmektedir. Ayrıca rötre eğrisinin büküm noktaları, BZSI'nın başlaması, pik noktası ve yavaşladığı nokta ile çakışmaktadır. BZSI ve rötre eğrilerinin orijine yaklaşması veya uzaklaşması ise benzer şekilde paralellik göstermektedir. Bu durum da hidrasyon süreci ile FKOR gelişiminin yakın ilgisini ortaya koymaktadır. Rötrenin hızlanma periyodu BZSI'nın artmaya başladığı anda başlamakta ve BZSI'nın başlangıçta bulunan düşük seviyelere gerilemesiyle rötre eğrisi yataylaşarak durma eğilimine geçmektedir. Bu noktada çimento hamuru yeterli oranda hidrate olduğundan sertleşmiş katı faz deformasyon direncine sahiptir. Bu noktadaki hidrasyon dereceleri de Tablo 5.2 de gösterildi. Tüm çimento hamurlarında FKOR'nin yavaşlama aşamasına geçmesi, hidrasyonun büyük oranda tamamlanması ile aynı sürede olmuştur. Tüm SA'lı hamurların büküm noktaları ile BZSI'nın artış pik ve azalış noktaları Tablo 5.3 de verildi. Büküm noktalarının değerlendirilmesinde, büküm noktalarının daha belirgin olarak elde edildiği SA içeren hamur numunelerin deney sonuçları kullanıldı.

Tablo 5.2: Hamurların erken yaşlarda hidrasyon dereceleri

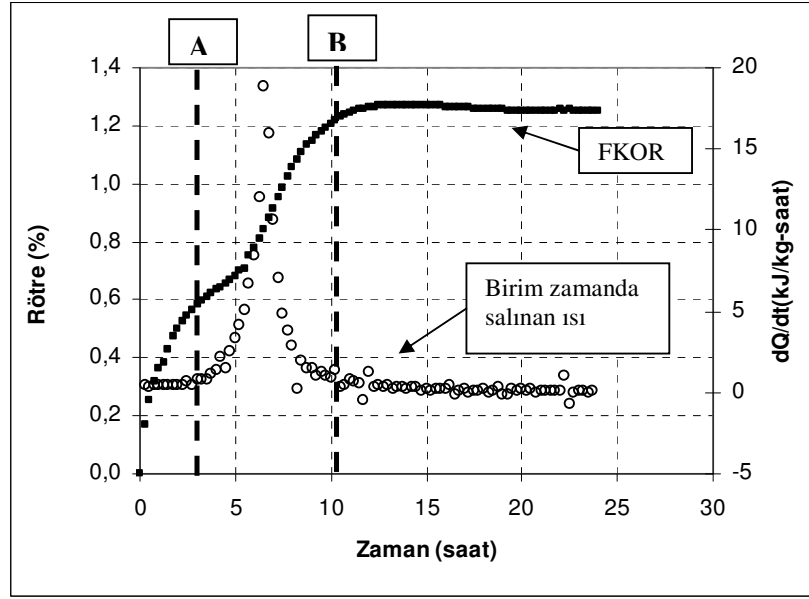
	Hidrasyon Derecesi (%)			
	5 saat	9,5 saat	24 saat	48 saat
C1SA	10,0	20,7	26,2	34,3
C2SA	15,7	25,7	39,2	49,3
C3SA	18,0	28,0	36,4	40,3

Tablo 5.3: Birim zamanda salınan ısı grafiği kritik noktaları

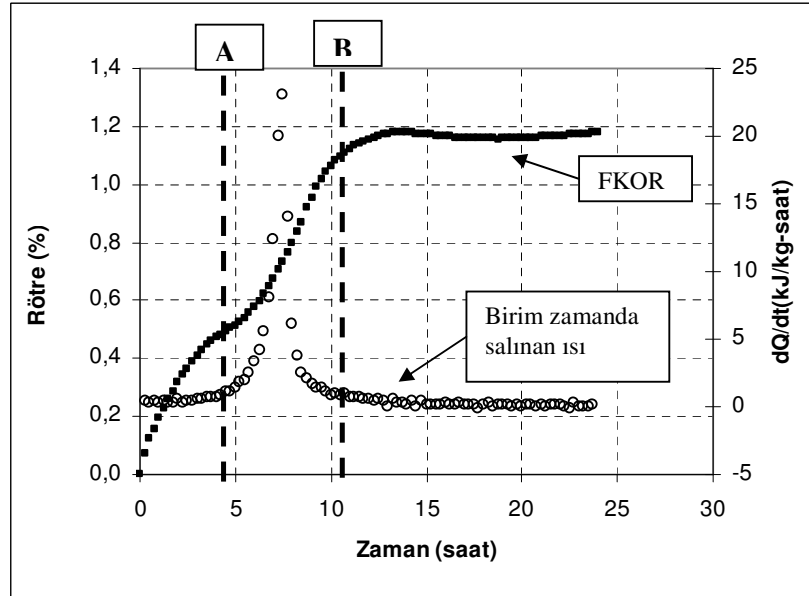
Numune	Artış başlangıcı		Pik noktası		Azalış sonu	
	(saat)	kJ/kg-saat	(saat)	kJ/kg-saat	(saat)	kJ/kg-saat
C1SA	4,50	1,483	7,0	20,519	10,50	1,285
C2SA	4,50	1,466	6,5	18,840	11,75	0,518
C3SA	5,00	1,429	7,5	23,111	10,25	1,002



Şekil 5.17: SA içeren 0,20 S/Ç oranlı C1 çimentosu hamurunda FKOR ve birim zamanda salınan ısı.



Şekil 5.18: SA içeren 0,20 S/Ç oranlı C2 çimentosu hamurunda FKOR ve birim zamanda salınan ısı.



Şekil 5.19: SA içeren 0,20 S/Ç oranlı C3 çimentosu hamurunda FKOR ve birim zamanda salınan ısı.

5.2.2. Hidratasyon dereceleri deney sonuçları, FKOR ve KOR ile ilişkileri

Hidratasyon konusunda hidratasyon ısılarının ölçülmesi ile birlikte hidratasyon derecelerinin (HD) saptanması incelenen ikinci özellik oldu. FKOR ve KOR'nin hidratasyon derecesiyle etkileşimini açıklamak amacıyla bu deneyler yürütüldü. Otojen rötre alanında en etkin faktör olan hidratasyon, S/Ç oranı düşük, su ve havadan izole edilmiş çimento hamurlarında, normal karışımlardan farklı yapılaşma ve süreçlere sahip oluyor ve böylece rötre davranışları da farklılık gösterdiği Bölüm 5.1 de açıklanmıştı.

HD deneylerinde tam izolasyon (Tİ) sağlanan ve S/Ç oranları 0,20 ve 0,25 olan iki seri numune ile suyla örtülü havadan izole edilmiş ortamda (Hİ) saklanan ve S/Ç oranı 0,20 ve 0,25 olan iki seri numune üzerinde deneyler yapılmıştır. S/Ç oranı 0,20 olan numunelerde SA katılmıştır, diğerlerinde SA yoktur. Bu deneylerde HD değerleri, su ile karışım izleyen 5., 9.5, 24 ve 48. saatlerde tayin edilmiştir. Ayrıca Tİ sistemindeki numunelerin 28. gün sonundaki HD değerleri de ölçülmüştür. Sonuçlar Bölüm 4'de Tablo 4.14'de verildi. Bu sonuçlara dayanılarak 5-9.5 saatleri, 9.5-24 saatleri ve 24-48 saatleri arasındaki periodlarda oluşan HD artış (%) leri hesaplanarak Tablo 5.4 de sunuldu. Ayrıca Tİ koşulu için hidratasyon derecesi-zaman eğrileri Şekil 5.19 ve 5.20 de de gösterildi. Tablo 5.4. deki periyodlar FKOR için tanımladığımız başlangıç, hızlanma ve yavaşlama aşamaları dikkate alınarak seçilmiştir.

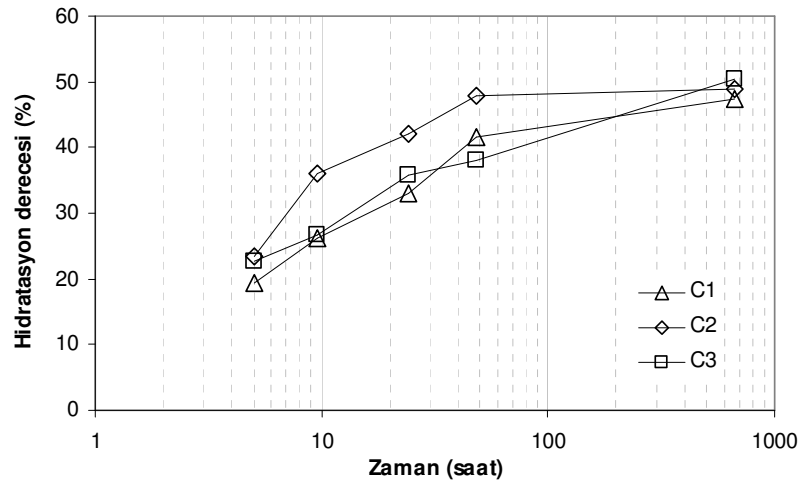
Tablo 5.4: Zaman aşamalarında gözlenen hidratasyon derecelerindeki artışlar (%)

a) Tİ sisteminde saklanan çimento hamrularındaki ilk 5 saate göre HD artış oranları (%)

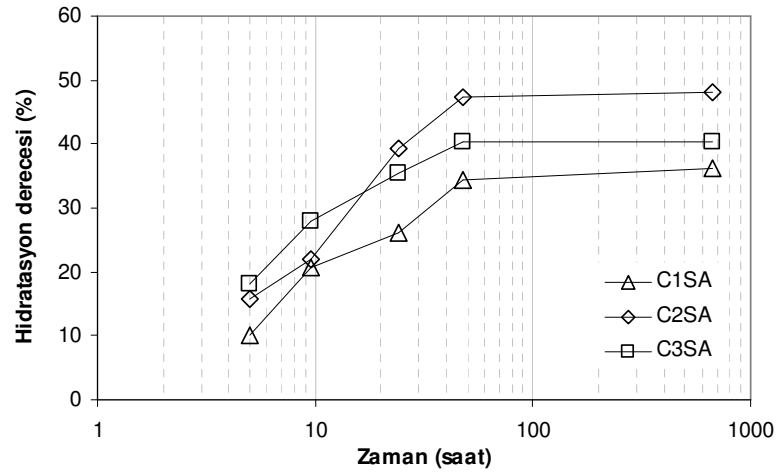
Çimento türü	1. S/Ç=0,20, SA katkılı			1. S/Ç= 0,25, SA katkısız		
	Süreler			Süreler		
	5-9,5 saat	9,5-24 saat	24-48 saat	5-9,5 saat	9,5-24 saat	24-48 saat
C1	107	27	31	35	26	26
C2	64	53	26	54	17	20
C3	56	30	11	11	33	7

b) Hİ sisteminde saklanan çimento hamrularındaki ilk 5 saate göre HD artış oranları (%)

Çimento türü	3. S/Ç=0,20, SA katkılı			4. S/Ç= 0,25, SA katkısız		
	Süreler			Süreler		
	5-9,5 saat	9,5-24 saat	24-48 saat	5-9,5 saat	9,5-24 saat	24-48 saat
C1	96	12	40	48	59	28
C2	45	58	19	91	31	17
C3	44	30	16	24	80	15



Şekil 5.20: Tİ koşulunda saklanmış SA içermeyen hamurların hidrasyon dereceleri



Şekil 5.21: Tİ koşulunda saklanmış SA içeren hamurların hidrasyon dereceleri

Grafiklerin incelenmesinden ve tablolardaki sonuçlara dayanılarak HD deney sonuçlarında saptanan genel durumlar ve eğilimler aşağıda özetlendi;

Tİ sisteminde saklanan numunelerde HD'deki en yüksek artış 5-9,5 saatleri arasında gerçekleşti. Daha sonraki sürelerde ise bu artışların azaldığı belirlendi. Hİ sisteminde saklanan numunelerde de bu benzer bir eğilim tespit edildi.

24 ve 48 saat arasında sonra HD değerlerindeki artışlarda büyük azalmalar meydana geldi ancak 48 saatten sonraki azalma çok belirgin oldu. S/Ç 0,20 olan ve SA içeren hamurlarda hidrasyonun 28. günde durduğu belirlendi. SA katkı içermeyen hamurlarda ise çok düşük oranlarda artış elde edildi (Tablo 5.2, Şekil 5.17 ve 5.18).

HD değerlerinde ve artışlarında çimento türlerinin de belirgin etkileri vardır. Düşük alkalili C1 çimento hamurlarında 5 saat sonundaki HD değeri Tİ ve Hİ sistemlerinde en düşük düzeydedir. Buna karşılık 5-9,5 saat aralarındaki artış ise en yüksek değerdedir. Bu yüksek artışa karşın varılan HD değeri diğer çimentolarinkine tam erişememiştir. Yüksek alkalili C3 çimentosu hamurlarında ölçülen HD değerleri ve artış değerleri C1 çimentosu hamurunun tam tersidir. 5 saat sonunda en yüksek HD değeri, 5-9,5 saat arasında ise en düşük artış değeri elde edilmiştir. Bu bulgular çimentodaki alkali içeriğinin hidrasyon süreci üzerinde önemli etkinlik taşıdığını kanıtlamaktadır.

HD deney sonuçlarını hidrasyon olayının kinetiği, süreci ve oluşturduğu ürünlerin türü ve morfolojisi yönünden irdelemek mümkündür. HD'nin yüksekliği sadece hidrate elemanlarını miktarını belirler, hidrate ürünlerin niteliğini yani içsel veya dışsal olup olmadıklarını açıklamaz. İlk 5 saatte oluşan ürünler Vernet'in açıklamasındaki karıştırma, ölü bölge, priz başlaması ve sertleşme başlaması olarak tanımladığı 4 aşamayı kapsar (**Vernet, 1995**). Vernet bu aşamaların karışımı izleyen ilk 9. ve 15. saatler arasında bittiğini varsayar, ancak çalışmamızda S/Ç oranının çok düşük olması, çimentolarda alkalilerin etkisi nedeniyle bu süre daha kısalmıştır. Bu 4 aşama sonunda oluşan hidratlar sıvı fazda meydana gelirler, bunlar, boşluklu ve gevşek yapılı CSH kristalleri, iğneli etrenjitler, hekzagonal Ca(OH)_2 kristallerinden oluşan dışsal ürünlerdir (**Locher ve diğ, 1976**)

Bu ilk 5 saatlik sürede çimento taneleri gerekli suyu kütle içinde bularak hidratlaşmışlar, ancak bu kütle içinde yeni kılcal boşluklar da oluşturmuşlardır. Meydana gelen hacimsel büzülme kimyasal bir kontraksiyondur. Ancak ortam

katılaşıp ve ince kılcal boru açısından zenginleşmiştir. Yüksek alkalili C3 çimentosu bu aşamada SO_3^- 'ü tespit ederek, etrenjit oluşumunu kısıtlayacağından ve hidratasyonu hızlandırabileceğinden HD değerinin C1 ve C2'ye göre daha yüksek çıktığı söylenebilir.

5. saatten sonra hidratasyon için gerekli olan su ince kılcal boşlukları dolduran suyun çekilmesiyle sağlanır. Böylece kendiliğinden kuruma süreci başlar ve fiziksel anlamda kontraksiyon gerilmeleri devreye girer. Nitekim sabit bir hızla artan FKOR ortaya çıkar ve etkinleşir. Bu arada hidratasyon da devam eder HD artışı 5-9,5 saat arasında artar ve KOR rötre oluşmasına katkıda bulunur. Hidratasyon Vernet'nin yavaşlama adını verdiği 5. aşama ile sürer.

10. saatte FKOR oluşumu durur, çünkü ince kılcallardaki su çok azalmıştır ve bu su boşluk çeperleri tarafından çok sıkı bir düzeyde tespit edilmiştir. Çimento taneleri bu suyu çekebilecek güce sahip değildir. Su hareketinin durması kendiliğinden kurumunun yarattığı fiziksel büzülme gerilmesini ortadan kaldırır.

Özetle, HD deneyleri sonunda elde edilen bulgular; S/Ç oranı çok düşük, izole edilmiş, izotermal koşullarda kürlenmiş hamurlarda 10 saatten sonra hidratasyonun sınırlı kaldığını, anhidrat tanelerin ileride kompoziteyi ve dayanımı artıran öğeler olacağını, hidratasyon ürünlerinin istenilenden düşük oranlarda ve türlerde teşekkül ettiğini ve hidratasyonun yol açtığı kılcal boşlukların da FKOR'e sebep olduğunu açıklarlar.

5.3. Mikroporozite Deneyleri

FKOR'nin ince kılcal boşluklardaki suyun hidratasyon sürecinde çekilebilmesine ve bu boşluk çeperlerinde kontraksiyon gerilmelerinin meydana gelmesine bağlı olduğu dikkate alınırsa, ince kılcal boşluk yapısı, dağılımı ve miktarının araştırılması ilginç ve gereklidir. Çalışmamızda civalı porozimetre yöntemiyle araştırmanın bu yönü de aydınlatılmak istendi. 4. Bölümde civalı porozimetre deney sonuçları Tablo 4.17, 4.18 ve 4.19 da özetle verildi, ayrıca tüm sonuçlar bu bölümde sunuldu.

Basıncılı civa porozimetre deneyi (MIP, mercury intrusion porosimetry) ile birçok araştırma yürütülmüş ve yayınlar yapılmıştır. 1970 den beri bu konuyla uğraşan S. Diamond 2000 yılındaki son yayınıyla bu teknikle çimento esaslı malzemelerin boşluk dağılımının ölçülemeyeceğini vurgulamıştır (**Winslow ve Diamond, 1970**), (**Diamond, 2000**). MIP'de kullanılan programlarda boşlukların silindirik bir

geometriye sahip ve dışa açık oldukları varsayılır. Boşlukların çapları, gönderilen basınç değerine dayanılarak Washburn denklemiyle saptanır. Bu denklem $D = -4g \cos \theta / P$ şeklindedir ve D silindirin çapı, g cıvanın yüzey gerilimi, θ cıvanın yüzeyle ıslatma açısı ve P uygulanan basınçtır. Çimento hamurlarında boşlukların tümünün bu niteliklere sahip olmadığı, ayrıca daima içlerinde muhakkak suretle hava boşlukları bulunacağı düşünülürse ölçülen boşluk çaplarının ne derece gerçek olduğu tartışılmalıdır. Diamond bu nedenle MIP'nin boşluk dağılımı incelenmesinde terk edilmesini ancak toplam mikroporozitenin ve kritik (eşik, threshold) çapın tayininde yardımcı olacağını kabul etmiştir. Diamond'un bu görüşünün makul olduğu kabul edilebilir.

Kritik çap kavramı sıvı geçirimliliği açısından önemli bir parametredir. Kritik çaptan daha büyük çapa sahip boşluklarda sıvının hareketi kolaylıkla gerçekleşir; bu koşulda hidratasyon da sürekliliğini korur. Mikro boşlukları dolduran cıvanın kritik boşluktan büyük boşlukları doldurma sürecinde basıncı düşüktür ve miktarı yani hacmi de azdır. Kritik çap sınırında doldurma işlevinin sürebilmesi için basınç aniden yükselmeye ve sevk edilen cıva hacmi aniden artmaya başlar. Diamond bu sınırdaki hamurda hapsedilmiş hava boşluklarının da basınç zoruyla açıldığını öne sürer. Bu ani basınç ve hacim artışı kritik çapın belirlenmesini sağlar. Hacmin boşluk çapına göre değişimini veren türev değeri de (dv/dD) bu sınırı saptamada yararlı olur. Türevin tepe noktasının absisi (D_{kritik}) hacim artış grafiğinde ani artış değeriyle çakışmalıdır.

Kritik çapın bulunması için Tablo B1-B16 da verilen ölçüm sonuçlarına dayanılarak “kümülatif boşluk hacmi-boşluk çapı”, “ $dV/d(\log D)$ -boşluk çapı” grafikleri çizilerek Şekil B1-B6’da gösterildi. Bu grafiklerden sağlanan D_{kritik} değerlerinin doğrulukları ve gerçeklikleri tartışılır durumdadır. Yukarıda açıklandığı gibi D’lerin hesabı teorik yolla Washburn denklemiyle yapılmakta ve boşlukların silindirik geometride oldukları varsayılmaktadır. Öte yandan günümüzde çok küçük boyutlu numuneler üzerinde yürütülen bu deneylerin heterojen bir yapıya sahip olan çimento hamurlarını yeterince örnekleme zorudur; çok sayıda numune üzerinde deney yapmak gerekir.

Şekil B1-B6’da $DV/d(\log D)$ grafiklerinin bir kısmında çok sayıda pikler oluştuğu görüldü. Bu durumun ancak yüksek S/Ç oranlı karışımlarda oluşabileceği ifade edilmektedir (Cook ve Hover, 1999) halbuki çalışmamızda bütün hamurların S/Ç oranı düşüktür. Birinci pik, D_{kritik} ’i belirten değer varsayıldı, zira bundan sonra

yüksek civa basıncının yapıyı tahrip ederek yeni boşluklar meydana getirdiği belirtilmektedir. Ardışık piklerin verdiği D_{kritik} değerleri bu yüzden tahribatsız esas yapıya ait kabul edilmedi.

D_{kritik} değerlerinin bulunmasında, kümülatif boşluk hacim-boşluk çapı eğrilerinden de yararlanıldı. Bu yöntem yukarıda açıklanmış, bu yöntemle bulunan D_{kritik} büyüklüklerinin $DV/d(\log D)$ 'den elde edilen kritik çaplarla çakışacağı vurgulanmıştı. Ancak bu çakışma sadece 3 deneyde gerçekleşebildi. $DV/d(\log D)$ yöntemiyle saptanan D_{kritik} değerleri genellikle kümülatif boşluk hacmi yöntemiyle bulunan değerlerden daha küçük oldu. 5.5, 5.6 ve 5.7 tablolarında D_{kritik} değerleri her iki yöntemle bulunan değerlerin ortalaması olarak verildi. Her iki yöntemin çok farklı olduğu durumlar belirtildi. Bu tablolarda ayrıca $dV/d(\log D)$ -boşluk hacmi yöntemiyle saptanan D_{kritik} değerleri ve toplam mikroporozite büyüklükleri de yazıldı. Kullanılan aletin civa basınç değerleri $0,2 \text{ N/mm}^2$ 'den başlamakta; $205-227 \text{ N/mm}^2$ arasındaki basınçlarda sona ermektedir. Boşlukların dolmaya başlaması için basıncın en az $2,3 \text{ N/mm}^2$ değerine varması gerekmektedir. Ancak bu durumda dahi dolan hacim ihmal edilecek düzeydedir. Güvenilir değerler ancak basınç 4 N/mm^2 değerine erişince elde edilebilmektedir. Tablolarda verilen çapların üst sınırı (en büyük değeri) boşlukların dolmaya başladığı, yani 4 N/mm^2 civarındaki ve üstündeki basınçlara erişildiği andaki değerdir, alt sınır ise $6,5-7,2 \text{ nm}$ arasında değişmektedir ve sabit kabul edilebilir.

Tablo 5.5: Tİ koşulunda 24 saat saklanan çimento hamurlarındaki D_{kritik} değerleri ve toplam boşluk hacimleri.

S/Ç oranı	Çimento türü	D_{kritik} (nm)	Toplam boşluk hacmi (mm^3/g)	Boşluk çapı (nm)	
				Üst sınır	Alt sınır
0,20 (SA katkılı)	C1	21 (16)	17,2	346	6,7
	C2	18 (*) (11)	16,0	288	6,8
	C3	21 (*) (11)	17,0	309	6,6
0,25	C1	16 (13)	30,0	655	7,0
	C2	23 (19)	47,0	444	7,0
	C3	21 (19)	33,0	532	7,0

Tablo 5.6: Hİ koşulunda 24 saat saklanan çimento hamurlarındaki D_{kritik} değerleri ve toplam boşluk hacimleri.

S/Ç oranı	Çimento türü	D_{kritik} (nm)	Toplam boşluk hacmi (mm^3/g)	Boşluk çapı (nm)	
				Üst sınır	Alt sınır
0,20 (SA katkılı)	C1	28 (25)	7,6	332	6,7
	C3	15 (15)	10,0	336	6,8
0,25	C1	35 (*) (19)	17,7	367	6,8
	C3	43 (*) (15)	23,2	372	6,8

Tablo 5.7: Tİ koşulunda 28 gün saklanan çimento hamurlarındaki D_{kritik} değerleri ve toplam boşluk hacimleri.

S/Ç oranı	Çimento türü	D_{kritik} (nm)	Toplam boşluk hacmi (mm^3/g)	Boşluk çapı (nm)	
				Üst sınır	Alt sınır
0,20 (SA katkılı)	C1	41 (35)	68	227	6,5
	C2	16 (19)	7	212	6,9
	C3	18 (18)	14	224	6,6
0,25	C1	- (38)	22	220	6,7
	C2	13 (13)	15	205	7,2
	C3	60 (*) (23)	33	227	6,5

Not: Tablo 5.5, 5.6 ve 5.7 de (*) işaretli değerlerde kümülatif boşluk hacmi- boşluk çapı ve $dV/d(\log D)$ - boşluk çapı yöntemleriyle saptanan D_{kritik} değerleri birbirlerinden önemli oranda sapmaktadır. Parantez içindeki değerler $dV/d(\log D)$ – boşluk çapı yöntemiyle bulunan değerlerdir.

Tablo 5.5, 5.6 ve 5.7 de özetlenen değerlerin anlamlı ve seçik bir değerlendirmeye olanak vermedikleri açıktır. Ancak D_{kritik} değerleri ve toplam boşluk oranlarında bazı genel davranış ve eğilimler bulgulanmıştır. D_{kritik} değerleri S/Ç oranı yüksek olan hamurlarda nispeten yüksek olmaktadır. Hİ koşulunda bu durum daha belirgin sayılabilir. Bu artış kür süresi uzadıkça (24 saatten,28 güne çıkış) gözlenmektedir.

Düşük alkali içerikli C1 çimento hamurlarının D_{kritik} değerleri S/Ç=0,20 katkılı durumda daha büyük değerler alıyor. S/Ç=0,25 durumunda ise bu davranış Hİ koşulunda ve uzun kürlü Tİ koşulunda gerçekleşebilmektedir.

Toplam boşluk hacimlerinin S/Ç=0,20 durumlarında ve Tİ koşulunda 24 saatlik numunelerde çimento türünün etkisi olmadı. Hİ koşulunda ise C3 çimentosunda bu hacim bir miktar yüksek oldu. S/Ç=0,25 durumunda ve Tİ koşulunda, yüksek alkalili çimento hamurlarında 24 saat ve 28 gün saklama sonucunda düşük alkalili C1 çimentosu hamurlarına göre daha yüksek toplam boşluk hacmi değerleri elde edildi. **Mehta (1986)**'nın 50 nm'den ince çatlakların rötreye ve sünmeye yol açtığı bulgusunu ve D_{kritik} değerlerinin en çok 38 nm olduğu dikkate alınarak 40 nm'den

küçük boşluk hacimlerinin toplam mikroporozite içindeki oranları hesaplandı; bulunan değerler Tablo 5.8 de gösterildi.

Tablo 5.8: 40 nm'den ince kılcal boşluk hacimleri ve toplam mikroporoziteye oranları

Kür süresi	Saklama koşulu	S/Ç oranı	Çimento türü	40 nm'den ince çapta boşluk hacmi, mm ³ /g	40 nm'den i.ç.b.h./Toplam mikroboşluk hacmi (%)
24 saat	Tİ	0,20	C1	15,7	95,3
			C2	15,5	96,8
			C3	15,2	89,4
	Hİ		C1	7,2	94,7
			C3	10,0	100,0
	Tİ	0,25	C1	22,4	74,7
			C2	30,1	64,0
			C3	21,9	66,3
	Hİ		C1	15,6	88,1
			C3	17,8	76,7
28 gün	Tİ	0,20	C1	33,3	48,9
			C2	6,3	90,0
			C3	12,4	88,5
		0,25	C1	13,0	59,0
			C2	11,9	79,3
			C3	16,8	50,9

Tablo 5.8'nin incelenmesi sonucunda S/Ç oranları 0,20 ve 0,25 olan çimento hamurlarında 40 nm den daha ince kılcal boşlukların hacimlerinin, toplam boşluk hacmi içindeki oranlarının çok yüksek olduğu saptandı. Bu oran Tİ koşulunda saklanan, S/Ç=0,20 olan ve 24 saat kürlenmiş hamurlarda ortalama %92,5, 28 gün kürlenmişlerde ortalama %89,2 olarak belirlendi. 28 günlük sonuçlarda C1 için hesaplanan oran (%48,9) bu ortalamaya katılmadı. Tüm değerler arasında en düşük

olan bu değerin deney tekniğinden veya numune örneklemesinden kaynaklandığı varsayıldı. Aynı yüksek ortalama oran Hİ koşulunda da gözlemlendi: %97,4.

S/Ç oranı 0,25 olduğunda Tİ koşulunda bu oranlar düşmüştür. 24 saatlik kürleme için ortalama %68,3, 28 günlük kürleme içinde %63,1 oranları elde edilmiştir. Hİ koşulu 24 saatlik kürlemede nispeten daha yüksek bir oran (%82,4) verebilmiştir.

40 nm çaplı kılcal boşluk hacimlerinin miktarları üzerinde yapılan bu incelemede çimento türünün etkisi bulgulanamadı. Buna karşılık S/Ç oranının ve kürleme süresinin işlevleri olduğu saptandı. Oranların yüksek oluşu FKOR nin yüksek olabileceğine bir kanıttır. Nitekim S/Ç düştükçe oranların düştükçe 40 nm den daha küçük çaplı boşluk miktarının tüm boşlukların miktarına oranı düşmekte ve FKOR büyük değer almaktadır (SA içermeyen C1 çimento hamuru dışında). 24 saat sonundaki FKOR değerleri ile 40 nm den küçük boşlukların tüm boşluklara oranı Tablo 5.9’ da karşılaştırılmıştır. Boşlukların ince boşlukların tüm boşluklara oranının 24 saatteki değeri 28. gündeki değerleriyle oldukça yakın değerler aldığı gözönüne alındığında; 24 saatten sonra 40 nm den ince boşlukların oranında bir artış olmadığı görülmektedir. Bu durum da otojen rötreinin 24 saatte neden büyük oranda tamamlandığını ve 24 saatten sonra çok az arttığını açıklamaktadır.

Tablo 5.9: 24 saat sonunda FKOR ile 40 nm den ince boşluk hacmi/toplam mikroboşluk hacmi oranı değerleri

Numune kodu	C1HM	C2HM	C3HM	C1SAHM	C2SAHM	C3SAHM
24 saat FKOR	0,940	0,957	1,220	1,182	1,254	1,179
24 saat Tİ koşulu 40 nm den i.ç.b.h/toplam mikroboşluk hacmi (%)	74,7	64,0	66,3	95	96,8	89,4

5.4. Çimento Hamuru, Harç ve Betonlarda Uzun Süreli Lineer Otojen Rötre Deneyleri

40 x 40 x 220 mm boyutlu prizmatik hamur, harç ve beton numuneler üzerinde 100 gün süren lineer otojen rötre ölçüm sonuçları 4. Bölümde Tablo 4.20-4.25 de verildi. Örnekler, deney süresince tam izole edilerek (Tİ koşulunda) ve $20 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve %65 bağıl nemli laboratuvar ortamında saklandı.

Numunelerin çimento dozajları, S/Ç oranları, agrega içerikleri detaylı biçimde Bölüm 4.1.3'de sunuldu. Değerlendirmelerde somut yargılar elde edebilmek amacıyla bu büyüklükler basitleştirilerek yaklaşık ortalama değerleri ile aşağıda özetlendi:

1. Çimento hamur numuneleri bileşimleri: S/Ç oranları 0,25 (SA katkısız) ve 0,20 (SA katkılı, %0,75 oranında, çimento ağırlığına oranla)
2. Harç numunelerin bileşimleri:
 - a) Çimento dozajı: 804 kg/m^3 , S/Ç=0,41, $D_{\max}=4\text{mm}$, agrega içeriği 1046 kg/m^3 , SA=0
 - b) Çimento dozajı: 788 kg/m^3 , S/Ç=0,25, agrega içeriği 1321 kg/m^3 , SA=%0,75 (çimento ağırlığına oranla)
3. Beton (mikrobeton) numuneleri birleşimleri:
 - a) Çimento dozajı: 706 kg/m^3 , S/Ç=0,42, $D_{\max}=8\text{mm}$ agrega içeriği 1261 kg/m^3 , SA=0
 - b) Çimento dozajı: 699 kg/m^3 , S/Ç=0,26 agrega içeriği 1546 kg/m^3 , SA=%0,76 (çimento ağırlığına oranla)

Agregaların ıslanma suları ağırlıklarının %1'i oranında varsayılarak harç ve betonların çimento fazlarındaki S/Ç oranları yaklaşık şekilde tahmin edildi.

- a grubu harçlarda çimento fazı S/Ç oranı 0,40 (0,41)
- b grubu harçlarda çimento fazı S/Ç oranı 0,23 (0,25)
- a grubu betonlarda çimento fazı S/Ç oranı 0,40 (0,42)
- b grubu betonlarda çimento fazı S/Ç oranı 0,24 (0,26)

Parantez içindeki değerler harç ve betonların S/Ç oranlarıdır. Bu yaklaşıma göre harç ve betonların S/Ç oranları, çimento fazlarının S/Ç oranlarına hemen hemen eşittir. Bu durumda S/Ç oranları 0,41 ve 0,42 olan harç ve betonların çimento fazlarıyla ilişkileri araştırılırken S/Ç oranları 0,25 ve 0,20 olan çimento hamurlarından yararlanmanın doğru bir yaklaşım olmayacağı düşünülmüştür. S/Ç oranları 0,40 olan çimento hamurları üretilmediğinden harç ve betonların çimento fazıyla ilişkileri ele alınamadı.

Deneylerin değerlendirilmesi için Tablo 4.20-4.25 sonuçlarından yararlanarak Şekil C.1-C.4 de grafikler çizildi. Şekil C.1 de çimento hamurlarının otojen rötreleri çimento türlerine göre çizildi ve S/Ç=0,20 ve S/Ç=0,25 için iki şekil elde edildi. Şekil C.2 de düşük S/Ç oranları (0,25 ve 0,26 ile üretilen harç ve betonların otojen rötreleri kendi çimento hamurlarının (S/Ç=0,25) FKOR'leri ile karşılaştırıldı.

Şekil C.3 ve C.4 ise S/Ç oranları 0,41-0,42 olan harç ve betonların otojen rötreleri ve S/Ç oranları 0,25-0,26 olan harç ve betonların otojen rötreleri kendi aralarında çimento türüne göre çizildi.

Şekillerdeki davranışları ve farklılıkları sayısallaştırmak için Tablo 5.10-5.13 düzenlendi. Tablo 5.10, hamurların otojen rötrelerinin harç ve betonların otojen rötreleri ile mukayesesini rakamsal olarak vermektedir, ve Şekil C.1'in rakamsal ifadesi olmaktadır. Tablo 5.11, 5.12, 5.13, hamur, harç ve betonların otojen rötrelerinin zaman içinde ne oranda meydana geldiklerini göstermektedir. Oranlar su ile karışımdan iki gün sonra oluşan rötrelerin 100 gün sonundaki son rötrelerin ne kadarına eşit olduğunu ve otojen rötre oluşumunun genellikle son bulduğu sürede,-bu süre 30 gün varsayıldı-, hangi orana eriştiğini vermektedirler. Tablo 5.10 daki harç otojen rötresi/hamur otojen rötresi ve beton otojen rötresi/hamur otojen rötresi oranları da 2, 30 ve 100 günlük rötre değerleri için hesaplanmıştır. 5.10 Tablosunda Şekil C.2' de verildiği gibi hamur, harç ve betonların S/Ç oranları 0,25 dir. Ancak harç ve betonlarda SA katkı içerirken hamur numuneler SA katkı içermemektedir.

Uzun süreli lineer otojen rötrelerde FKOR ve KOR ayırımını yapabilmek olanağı yoktu. Bu bakımdan ölçümler otojen rötre olarak adlandırıldı ve böylece değerlendirildi. Uzun süreli deneylerde izolasyonun başarılı olup olmadığını kanıtlamak amacıyla bir kısım numunede başlangıçta ve 100 gün sonundaki ağırlıklar ölçüldü; ağırlık kayıpları tayin edildi. Ağırlık kayıpları C1, C2, C3 katkısız

hamurlarda sırasıyla % 0,2 , % 4 , %0; SA katkılı C1, C2, C3 hamurlarında ise sırasıyla %0, % 0,4 ve % 0,7 oldu. Bir numunedeki %4 değeri dışında kayıpların %0,2 ve %0,7 arasında kalması sonucunda, izolsayonun yeterli ve başarılı olduğu varsayıldı.

Tablo 5.10: Hamur otojen rötreleri ile harç ve beton otojen rötrelerinin karşılaştırılmaları, oranları.

Çiment o türü	2 günlük sonuçlar			30 günlük sonuçlar			100 günlük sonuçlar		
	Hamu r otojen rötres i (μD)	$\frac{harç \text{ o.r.}}{hamur \text{ o.r.}}$	$\frac{beton \text{ o.r.}}{hamur \text{ o.r.}}$	Hamu r otojen rötres i (μD)	$\frac{hç \text{ o.r.}}{hm \text{ o.r.}}$	$\frac{bt \text{ o.r.}}{hm \text{ o.r.}}$	Hamu r otojen rötres i (μD)	$\frac{hç \text{ o.r.}}{hm \text{ o.r.}}$	$\frac{bt \text{ o.r.}}{hm \text{ o.r.}}$
		(%)	(%)		(%)	(%)		(%)	(%)
C1	865	143	115	1135	121	97	1140	121	98
C2	560	44	83	1200	69	55	1255	66	58
C3	1205	45	22	1820	28	19	1848	39	18

Tablo 5.11: Hamur numunelerde zamanın fonksiyonu olarak oluşan, lineer otojen rötre değerleri ve maksimum rötreye oranları

S/Ç	Çimento türü	100 günlük otojen rötre değeri (μD)	2 günlük otojen rötre		30 günlük otojen rötre	
			Değer (μD)	Oran (%)	Değer (μD)	Oran (%)
0,20 (SA katkılı)	C1	2328	2150	92,5	2300	99,0
	C2	3050	2155	71,0	2763	91,0
	C3	2835	2260	79,0	2835	100,0
0,25	C1	1140	865	76,0	1135	99,5
	C2	1255	560	45,0	1200	96,0
	C3	1848	1205	65,0	1820	98,0

Tablo 5.12: Harç numunelerde zamanın fonksiyonu olarak oluşan, lineer otojen rötre değerleri ve maksimum rötre oranları

S/Ç	Çimento türü	100 günlük otojen rötre değeri (μD)	2 günlük otojen rötre		30 günlük otojen rötre	
			Değer (μD)	Oran (%)	Değer (μD)	Oran (%)
0,25 (SA katkılı)	C1	1380	1238	90	1380	100
	C2	879	245	28	829	94
	C3	729	543	75	729	100
0,41	C1	455	280	62	412	91
	C2	710	235	33	645	91
	C3	520	130	25	518	99

Tablo 5.13: Beton numunelerde zamanın fonksiyonu olarak oluşan, lineer otojen rötre değerleri ve maksimum rötre oranları

S/Ç	Çimento türü	100 günlük otojen rötre değeri (μD)	2 günlük otojen rötre		30 günlük otojen rötre	
			Değer (μD)	Oran (%)	Değer (μD)	Oran (%)
0,26 (SA katkılı)	C1	1121	996	89	1103	98
	C2	732	466	64	659	90
	C3	341	260	77	341	100
0,42	C1	390	60	15	382	98
	C2	310	80	26	220	71
	C3	215	-	-	135	63

Şekil ve tabloların incelenmesi ile varılan sonuçlar aşağıda özetlendi.

1. Otojen rötrelerin 100 gün sonundaki değerleri hamur, harç ve betonlarda S/Ç oranları düşük olan ve SA içeren karışımlarda daha yüksek değerler aldılar. Bu bulgu 2 ve 30 günlük otojen rötre değerlerinde de gerçekleşti. Düşük ve yüksek S/Ç oranlı numunelerin aralarındaki fark büyük ölçüde ilk iki gün içinde ortaya çıkan farktan kaynaklandı.

2. 2 günlük numunelerde otojen rötreler 100 günlük otojen rötrelerle, düşük S/Ç oranlı ve SA içeren C1 çimentolu hamur, harç ve betonlarda, %92,5, %90 ve %89 oranlarıyla yaklaşmaktadırlar; yani son rötre değerine çok yakın değerler almaktadırlar. Diğer çimento türleriyle yapılan karışımlarda, özellikle betonlarda bu oranlar %15-%26 arasında değerler alarak çok düşük olabildiler. (betonlarda)

3. Otojen rötre artışları hemen hemen tüm karışımlarda 30 gün kadar sürebilmektedir. Sadece C2 ve C3 çimentoları ile üretilen ve S/Ç oranları 0,42 olan betonlarda 30 günlük otojen rötreler son rötrelerin %71 ve %63'üne indi, diğer tüm karışımlarda 30 günlük rötrelerin son rötrelerle oranları %90 ve %100 arasında oldu. Özellikle C1 çimentolu tüm karışımlarda bu oranlar %98-%100 sınırındadır. (tek istisna S/Ç=0,42 olan betondur ve oran %91dir)

Tablo 5.10 da agrega katılmasıyla rötrenin azalacağı doğal olarak bekleniyordu. Bu olgu C1 esaslı karışımlarda tamamen aksi yönde belirdi. Hamurlardaki rötrenin bu karışımlarda çok yüksek oluşu, agregaların pozitif katkısını gölgeledi. C2 ve C3 çimentolu karışımlardaki değerler kuruma rötrelerinde kullanılan Pickett formülünün (eşitlik 5.1) otojen rötrelerde de geçerli olabileceğini düşündürdü, bu yaklaşım C3 çimentosu harç ve betonlarında araştırıldı (Akman, 1990).

$$\epsilon_{r\text{beton}} = \epsilon_{r\text{çim hamuru}} (1-a)^n \quad (5.1)$$

ϵ_r rötre değerlerini, a 1 m³ betondaki agrega mutlak hacmini ifade eder. C3 çimentosu ile üretilen hamur, harç ve betonların 100 günlük ve 2 günlük otojen rötre oranları kullanılarak “n” katsayılarının alabileceği değerler bulundu. Harç ve betonların birleşimlerine göre “a” değerleri harçlar için 0,498 m³, betonlar için 0,577 m³ olarak hesaplandı. Diğer taraftan otojen rötre oranları da 100 günde $\epsilon_{r\text{harç}}/\epsilon_{r\text{hamur}}=0,39$, $\epsilon_{r\text{beton}}/\epsilon_{r\text{hamur}}=0,18$, 2 günde $\epsilon_{r\text{harç}}/\epsilon_{r\text{hamur}}=0,45$, $\epsilon_{r\text{beton}}/\epsilon_{r\text{hamur}}=0,22$ olarak Tablo 5.9 dan elde edildi. Pickett denklemleri böylece 100 gün sürede harçta $0,30=(1-0,498)^{n1}$, betonda $0,18=(1-0,577)^{n2}$ ve 2 gün sonunda harçta $0,45=(1-0,498)^{n3}$, betonda $0,22=(1-0,577)^{n4}$ şeklinde yazıldı ve çözümler sonunda n1=1,37, n2=1,99, n3=1,16, n4=1,64 sayıları elde edildi. Bu değerler kuruma rötreleri için önerilen 1,2-1,7 değerlerine yakındır. Otojen rötre değerlerini sadece çimento fazı, hamurlar üzerinde ve Tİ koşulunda deneyler yaparak betonun otojen rötresini bu yöntemle tahmin etmek olanaklı olacaktır; ancak çeşitli türdeki çimentolar denenerek

kesin sonuca ulaşılmalıdır. Bu yaklaşımın FKOR' de verdiği sonuçlar düşünülürken düşük S/Ç oranlı betonlarda FKOR ile kuruma rötresinin aynı mertebelerde olduğu gözden kaçırılmamalıdır (Weiss, 2002).

S/Ç=0,30 olan betonun FKOR'sinin üçüncü günde kuruma rötresine eşit olduğunu (450 mikrodeformasyon), 56. günde de 700 mikrodeformasyon FKOR ve 1300 mikrodeformasyon kuruma rötresi yaptığını belirtmektedir. Ayrıca S/Ç oranı daha düşük olduğunda FKOR'nin kuruma rötresinden daha yüksek değerler alabileceği belirtilmektedir.

Uzun süreli lineer otojen rötre deneylerine paralel olarak saklama koşulunun (Tİ koşulu) basınç dayanımlarına etkilerini saptamak amacıyla eğilme ve basınç deneyleri de yapıldı. Basınç deneyleri 4 x 4 x 22 cm lik prizmatik numunelerin eğilmede kırılan parçaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımları, 4 x 4 cm boyutlu elemanlarda tayin edilmiş olmaktadır. 4. Bölümde 1 yıl yaşındaki eğilme ve basınç dayanımları Tablo 4.10 ve Tablo 4.11 de verildi. Tİ koşulu dışında su içinde standard saklama koşuluna göre saklanan numunelerin dayanımları da saptandı. Tİ koşulunun standard saklama koşuluna nazaran basınç dayanımlarında ne oranda azalmaya yol açtığını göstermek amacıyla Tablo 5.14 düzenlendi. Basınç dayanımlarında gözlenen azalma oranları dolaylı yoldan hidratasyon sürecinin ne düzeyde kısıtlandığını da ifade edebilmektedir. SA içermeyen numunelerde Tİ koşulunda saklananların basınç dayanımlarının Hİ koşulunda saklananların basınç dayanımlarına oranları düşük bulundu. SA içeren numunelerde ise bu oranlar yüksekti, yani hidratasyon daha üst düzeyde oluşabilmişti. Diğer bir ilginç bulgu C1 çimentosu ile üretilen numunede yüksek, C3 çimentosu ile üretilenlerde düşük oranlar meydana gelmiştir. Tİ koşulu S/Ç çok düşük ve SA içeren üretimlerde hidratasyon sürecini negatif olarak etkilememiştir.

Tablo 5.14: Standard su içinde ve Tİ koşullarında saklanan hamur, harç ve beton numunelerin 1 yıllık basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

	Çimento türü	Tİ koşulundaki basınç dayanımı (%)		
		Standard su içindeki basınç dayanımı		
		Hamur	Harç	Beton
SA katkısız	C1	86	73	93
	C2	73	73	67
	C3	118	67	66
SA katkılı	C1	118	98	98
	C2	93	100	92
	C3	95	100	81

5.5. Çimento Bileşenlerinin Otojen Rötire Oluşumuna Etkileri ve Etkinlik Düzeyleri

Su/çimento oranları çok düşük olan betonların üretimlerinin ilk günlerinde ortaya çıkan fiziko-kimyasal nitelikli otojen rötire bölümü (FKOR), son yıllarda en çok ilgi çeken ve araştırılan bir konudur. Çalışmanın bu kısmında FKOR'nin oluşumundaki faktörlerin neler olduğu ve ne oranda etkinlik taşıyabilecekleri irdelenmeye çalışıldı.

FKOR'nin ana faktörü hidrasyon sürecidir. Hidrasyon ısı, derecesi, sürekliliği, iç yapı boşluk düzeninde sebep olduğu değişim, FKOR'yi nitelik ve nicelik yönünden etkiler. Hidrasyon sürecini ve iç yapı morfolojisi değiştiren öğeler, doğal olarak dolaylı yoldan FKOR'yi değiştiren faktörlerdir. Bunların başında çimento bileşenlerinin tür ve oranları gelir. Su/çimento oranı, kimyasal katkıların varlığı, çimentonun inceliği de bu faktörler arasındadır. Çimento bileşenleri arasında, minör bileşenlerden olan alkaliler hidrasyon kinetiğini değiştirmek bakımından önemli rol oynarlar. Bu konuda asıl etkinliği çözünen alkalilerin varlığı taşır. Bu nedenle de çalışmamızda çözünen alkali oranları değişik olan 3 tür çimento kullanıldı. C1 düşük, C2 orta, C3 yüksek oranlarda çözünen alkali içerecek şekilde seçildi.

Çözünen alkalilerin hidrasyon sürecindeki en belirgin etkinlikleri CaSO_4 oluşumunu kısıtlamaları ve arayer sıvısındaki Ca^{++} iyonlarının çözünürlüğünü geciktirmeleri ve önlemeleridir. Bu iki etki önce etrenjit teşekkülünü sınırlar, Vernet'nin hidrasyonun birinci aşaması olarak adlandırdığı süreç değişikliğe uğrar;

C₃A'nın süratle hidrate olmasına, prizın hızlanmasına yol açılır. Ancak ortamda SO₃⁻ içeriğinin yüksekliği bu değişikliği hafifletir ve böylece $\frac{SO_3^-}{\text{çözünen alkali}}$ oranı (süfatizasyon oranı) dengeleyici ve önleyici bir faktör olarak hidratasyon sürecine katılır.

Çözünen alkalilerin ikinci etkinliği olan Ca⁺⁺ iyonlarının çözünürlüğünü kısıtlama işlevi, Vernet'nin ikinci aşama olarak tanımladığı ölü bölgede tesirli olur, CSH ve hidrate aluminatların oluşu çok azdır. Bu süreçte FKOR'nin başlangıç aşaması meydana gelir, aslında başlangıç aşamasında fiziksel büzülmenin varlığının büyük ölçüde olamadığı dikkate alınır, bu rötre büyük ölçüde KOR'dir. Ölü bölgenin uzaması başlangıç rötresinin artmasına yol açar. Hidratasyonun üçüncü aşaması prizle başlar ve FKOR'nin hızlanması aşamasına girilir. Alkaliler bu aşamanın başlamasını ve sürmesini kısaltırlar. Hızlanma aşaması dördüncü sertleşme sürecinde de devam eder. Hidratasyonun beşinci aşaması yavaşlamadır ve FKOR'de son bulmuştur.

Alkaliler hidratasyon ısısının gelişmesini ve miktarını da etkilerler. Alkali oranının artması durumunda, karıştırma başlangıcında hidratların kimyasal olarak bağladıkları su artar, kristal yapıları kararsızlaşır, tane boyutları büyür, ortam flokülleşir ve boşluklu bir yapı oluşur. Sonuçta ilk günlerdeki mekanik dayanım yüksek olursa da son dayanım düşer. Alkalilerin kuruma rötresini ve plastik rötreyi artırdıkları da tespit edilmiştir. Ancak otojen rötre üzerinde alkalilerin etkinliği henüz yeterince somutlaştırılamamıştır.

Çimento bileşenleri arasında C₃A ve C₄AF'in de otojen rötreyi etkilediği konusunda yayınlar vardır. Bu iki mineral ayrı ayrı, veya toplam olarak, veya oran olarak ele alınmışlardır ancak etkinlik düzeylerinin niçin farklı mertebelerde dikkate alındığı mevcut yayınlarda açıklanmamaktadır (**Bentz ve diğ., 2001**), (**Tazawa ve Miyazawa, 1995**), (**Miyazawa ve diğ., 2001**), (**Tazawa ve diğ. 1997**). Çimentoların inceliğinin de FKOR üzerinde önemli bir etken olduğundan bahsedilmektedir (**Bentz ve diğ. 2001**). Bunun üzerine çimentoların inceliğinin de bir faktör olarak incelenmesi uygun bulunmuştur.

Çimento'nun bileşenleri dışında FKOR'yi denetleyen başka oluşumlar da bulunmaktadır. Çimento hamurunun mikroporozitesi hernekadar çimento

niteliklerine, hidratasyon kinetiğine, kür koşullarına bağlı olarak gelişse de, sertleşmiş çimento hamurunun boşluk dağılımı FKOR'yi etkiler. Çimento fazındaki düşük su/çimento oranı ve bu oranı indirgemek amacıyla karışımlara katılan süperakışkanlaştırıcı da FKOR varolması yönünde etkinlik taşırlar.

FKOR'yi sadece çimento bileşimindeki çözünen alkaliler faktörüne dayanarak irdelemek ve ayırdetmek görüldüğü gibi zor hatta imkansızdır. Diğer faktörleri sabitleyerek konuyu ele almak ise pratik bakımdan olanaksızdır. Farklı alkali içerikli fakat diğer bileşenleri, içerikleri sabit endüstriden sağlanmayan özel çimento üretmek düşünülemez. Bu bakımdan mevcut fabrika ürünü çimentolarla bu tür bir araştırmayı yürütmek kaçınılmazdır.

İrdeleme, tüm etkin faktörlerin miktar ve dağılımları dikkate alınarak yürütülmeye çalışıldı. FKOR üzerinde etkinlik taşıdıkları varsayılan çimento bileşenleri ve nitelikleri aşağıda C1, C2 ve C3 çimentoları için verildi. Ayrıca bu faktörlerin oransal etkinlik dereceleri de, en yüksek çözünen alkali içeren C3 çimentosunun etkinliği her bileşim faktörü ve özelliğinde %100=1 varsayılarak hesaplandı. Elde edilen değerler Tablo 5.15 de verildi.

Tablo 5.15: FKOR oluşmasında etkin olan çimento bileşenleri (100 g çimentoda) ve oransal etkinlikleri.

Çimento türü	Çözünen alkali içeriği		C ₃ A içeriği		C ₃ A + 0,1C ₄ AF (*)		İncelik		$\frac{SO_3^-}{\text{ç.alkali}}$	
	Miktar (g)	Oransal etkinlik	Miktar (g)	Oransal etkinlik	Miktar (g)	Oransal etkinlik	1/İncelik faktörü (10 ⁻³)	Oransal etkinlik	Oran (%)	Oransal etkinlik
C3	0,847	1,00	8,86	1,00	9,92	1,00	195	1,00	3,28	1,00
C2	0,630	0,74	6,27	0,71	7,36	0,74	228	1,17	4,24	1,29
C1	0,426	0,50	6,13	0,69	7,28	0,73	276	1,41	6,67	2,03

(*) C₃A ve C₄AF, literatürde otojen rötreye etkileri bakımından bu oranlarla kullanılmıştır (**Beltzung ve Wittmann, 2002**).

Tablo 5.15 deki sıralandırmaya göre yüksek çözünen alkali içeriği rötre arttırma bakımından en etkin faktör olma olasılığına sahip gözükmemektedir. Yüksek çözünen alkali içerikli C3 çimentosunun rötre arttırma olasılığı en düşük alkalili C1

çimentosunun olasılığının $2(=\frac{1}{0,5})$ katıdır. C_3A içeriğine bağlı rötre arttırma olasılığı yine C_3 çimentosunda yüksektir ve C_1 çimentosunun arttırma olasılığının $1,45(=\frac{1}{0,69})$ katıdır. C_3A ve C_4AF birlikte düşünüldüğünde “ $C_3A+0,1C_4AF$ ”nin rötre arttırma olasılığı da C_3 için yüksektir ve C_1 ’in arttırma olasılığının $1,37(=\frac{1}{0,73})$ katıdır. Otojen rötre yi arttıran faktörler arasında çimentonun inceliği de bulgulanmıştır. C_1 çimentosu en yüksek inceliğe sahiptir, bu çimentoda inceliğin oluşturacağı rötre artışının C_3 ’e oranla %41 fazla olabileceği Tablo 5.15 de görülmektedir.

Yüksek oranda çözünen alkali içeriğinin hidratasyon süreci üzerindeki hızlandırıcı etkisini karşılamak üzere ortamdaki SO_3^- içeriğini arttırmak gerektiği vurgulanmıştır (Akman, 2000a). Bu nedenle Tablo 5.15’de SO_3^- /çözünen alkali oranı da bir etken faktör olarak ele alınmıştır. Bu faktör, incelenen çimentolarda olması gerekenin aksine C_1 çimentosunda en yüksek değerdedir ve C_3 ’ün 2,03 katına eşittir ve C_1 çimentosunun rötresinin düşük olması yönünde olumludur.

Çimento bileşenlerine bağlı faktörlerin tümü, çözünen alkali içeriği düşük olan C_1 çimentosu ile üretilen hamur, harç ve betonların otojen rötrelerinin düşük olabileceği yönündedir. Sadece incelik faktörü bu olumlu yargıya ters yönde etkinlik taşımaktadır.

FKOR’nin oluşmasına ve yüksek değer almasına yol açan çimento bileşenlerinin nicelik ve nitelikleri dışında çimento hamurunun oluşum süreci ve boşluk yapısının da dolaylı olarak FKOR’e etkileri vardır. Hamurun oluşum süreci ve boşluk yapısı hidratasyon süreci ve kinetiği ile ilgilidir. Hidratasyonun erken ve hızlı gelişimi ve meydana getirdiği boşlukların çok ince kılcal boşluklar olması FKOR’nin kısa sürede yüksek değerler almasına imkan verir. Bu amaçla hidratasyon ısısının, derecesinin ve salıverilen maksimum ısı enerjisinin değerleri ve zaman ölçeğindeki yerleri çimento türlerine göre saptanarak FKOR-hidratasyon ilişkileri incelendi. Hamurların boşluk dağılım ve yapılarını saptamak için de mikroporozite ölçüm sonuçları analiz edildi. Bu konudaki değerlendirmelerde deney sonuçları tekrarlanarak, C_1 ve C_2 ’nin etkinlikleri C_3 çimentosunun etkililiğine oranlanarak belirlendi. Tablo 5.15 deki

uygulama sistemine benzer olarak C3'nin oransal etkinliği $\%100=1$ olarak kıyaslamalar yapıldı.

Tablo 5.16'da hidratasyon ısılarının artmasında çimento türlerinin etkinlik düzeyleri sunuldu, hidratasyon derecesi deneylerinin uygulandığı ve yaklaşık olarak herbir aşamanın sonuna gelen 5: 9,5: 24 saatlik ve 28 günlük ölçmelerdeki sonuçlar değerlendirildi. Tablo 5.17'de hidratasyon derecesi değerlendirmelerinde, hidratasyon ısı deneyleri ile aynı sürelerde yapılan deney sonuçları kullanıldı, bu sürelerde hidratasyon, 2-propanol katılarak durdurulmuş ve hidratasyon dereceleri saptanmıştı.

Tablo 5.16: Hidratasyon Isıları (HI) yönünden oransal etkinlikler

S/Ç ve saklama koşulu	Çimento Türü	5 saat	9,5 saat	24 saat	28 gün
Tİ koşul	C3	1,00	1,00	1,00	1,00
S/Ç=0,25	C2	0,61	0,65	0,96	0,96
katkısız	C1	0,72	0,99	1,00	1,00
Tİ koşul	C3	1,00	1,00	1,00	1,00
S/Ç=0,20	C2	1,49	1,00	1,00	0,54
SA katkılı	C1	1,65	1,13	1,10	0,57

Hidratasyon ısıları yönünden S/Ç=0,25 olan ve SA içermeyen numunelerde, başlangıç ve hızlanma aşamaları sonlarında C2 ve C1 çimentoları C3 çimentosuna göre daha düşük etkinlik gösterdi. Çimentoların 24 saat ve 28 günlerdeki etkinliklerinin birbirine yakın olduğu bulguları. Buna karşılık S/Ç=0,20 olduğunda C1 türü çimentolu hamurlar C3'den çok daha aktif bir davranışa sahip oldular. Aktivite özellikle başlangıç aşamasında daha belirgindir. Ancak sertleşmelerini büyük ölçüde tamamlamış 28 günlük C3 çimentolu hamurlarda S/Ç=0,20 durumunda hidratasyon ısıları daha yüksek değerler aldı. Zira C3 çimentosu SA kullanımı durumunda birim zamanda salınan ısı enerjisi maksimum değeri bakımından C1 ve C2 çimentolarından farklı davranış sergilemişti. Bu farklı davranışın çimento katkı etkileşiminden kaynaklanabileceği düşünüldü.

Hidratasyon derecelerinin oluşumu ve etkinlikleri Tablo 5.17’de karşılaştırılmıştır. Bu deneylerin bir bölümünde Hİ koşulunda (suyla kaplı, havadan izole) saklanan numunelerin sonuçları da bulunmaktadır.

Tablo 5.17: Hidratasyon dereceleri (HD) yönünden oransal etkinlikler

S/Ç ve saklama koşulu	Çimento türleri	5 saat sonu	9,5 saat sonu	48 saat sonu
Tİ koşul S/Ç=0,25 katkısız	C3	1,00	1,00	1,00
	C2	1,04	1,36	1,33
	C1	0,85	0,98	1,09
Tİ koşul S/Ç=0,20 SA katkılı	C3	1,00	1,00	1,00
	C2	0,87	0,92	1,22
	C1	0,56	0,74	0,85
Hİ koşul S/Ç=0,25 katkısız	C3	1,00	1,00	1,00
	C2	1,02	1,58	1,26
	C1	0,84	1,00	0,98
Hİ koşul S/Ç=0,20 SA katkılı	C3	1,00	1,00	1,00
	C2	0,72	0,82	1,01
	C1	0,44	0,60	0,62

Genellikle C3 çimentolu hamurlarda HD değerleri C1 çimentolu hamurların HD değerlerinden yüksektir. Bu durum hem Tİ hem Hİ saklama koşullarında S/Ç oranı 0,20 değerine indirildiğinde ve SA katıldığında daha belirgin olmaktadır. Bu bulgu hidrtasyon ısısı sonuçlarıyla uyumlu değildir. HD’nin yüksek olması, HI’nin yüksek olmasıyla örtüşmemiştir, bu durum özellikle Tİ koşulunda S/Ç=0,20 konumunda 5 saatlik HI değeride belirlenmiştir. Erken yaşlarda (48 saat) ve toplam olarak en yüksek hidratasyon ısısı salan bileşenler C_3S ve C_3A ’dır. Bu karma bileşenler C3, C2 ve C1 çimentolarında 100 g da toplam olarak sırasıyla 65.91g, 60.64 g, 58.80 g dır. Bu içeriklere göre C3’ün en yüksek hidratasyon ısısını salması doğaldır. Tİ koşulunda S/Ç oranı 0,20’ye indirildiğinde ilk 5 saatte bu eğilimin büyük farkla tersine dönmesi şaşırtıcıdır; buradaki HI değerleri tekrar incelendiğinde C3, C2 ve C1 çimentolarının ortaya çıkardıkları ısıların sırasıyla 11,7 ve 19,3 ve 17,4 kJ/kg olduğu görülmektedir. Sonuçlar toplam hidratasyon ısısıyla karşılaştırıldığında

aralarındaki küçük farkın mertebelerin düşüklüğünden dolayı oransal olarak yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir. Bundan dolayı SA içeren numunelerin HI deneylerinde 5 saatlik sonuçların değerlendirme dışı bırakılmasının daha sağlıklı olacağı düşünülmüştür. HD sonuçlarına dayanarak C3 çimentosunun gerçekleştirdiği hidratasyon derecesi düzeyinin üstünlüğü nedeniyle daha yüksek otojen rötre oluşumuna yol açtığı söylenebilir.

Hidratasyon sürecinde izlenen üçüncü konu HI enerjilerinin salıverilme süreçleri oldu. Salıverilen enerji zamanın fonksiyonu olarak incelendiğinde bir maksimum değere sahip olduğu görülmektedir. Bu maksimumun büyüklük ve zaman ölçeğindeki yeri çimento türüne göre Tablo 5.18 de verildi: maksimum değer hızlanma aşamasının ortasına isabet ettiği saptandı. Bkz. Şekil 5.16-5.18

Tablo 5.18: Zamanla salınan hidratasyon ısı enerjilerinin maksimum değerleri ve başlangıca olan uzaklıklarının çimento türüne bağlı değişimleri.

S/Ç ve saklama koşulu	Çimento türleri	Maksimum enerji		Başlangıca yakınlık	
		Değeri (kJ/kg.saat)	Oransal etkinlik	Süresi (dakika)	Oransal etkinlik
Tİ koşul S/Ç=0,25 katkısız	C3	21,5	1,00	300	1,00
	C2	12,7	0,61	330	1,10
	C1	13,2	0,59	312	1,04
Tİ koşul S/Ç=0,20 SA katkılı	C3	23,1	1,00	450	1,00
	C2	18,8	0,89	390	0,87
	C1	20,5	0,81	420	0,93

Salıverilen maksimum ısı enerjisi S/Ç =0,25 ve 0,20 oranlarında C3 çimentosunda yüksek değerler aldı. S/Ç=0,20 durumunda çimento türleri için maksimum ısı enerjileri arasındaki farklar azaldı. Zaman ölçeğinde maksimum ısının başlangıca yakınlığı ise S/Ç=0,25 durumunda tüm çimentolarda farklı olmadı. S/Ç= 0,20 durumunda tüm çimentolarda S/Ç=0,25 durumuna göre başlangıçtan uzaklaşma oldu, bu uzaklaşma C2 ve C1'ler için daha az gerçekleşti. Tüm bunlara dayanılarak hidratasyon reaksiyonunun C3 çimentosunda daha hızlı gerçekleştiği bunun da daha yüksek FKOR'ye neden olduğu anlaşılmaktadır. S/Ç oranı düştüğünde ve SA kullanıldığında ise çimentoların ortaya çıkardığı maksimum ısılar arasındaki farkların önemli mertebelerde gerçekleştiği görülmektedir.

FKOR'nin gelişmesinde içyapı morfolojisinin detaylı etkisinin araştırılmasında mikroporozite incelemesine başvurulduğu daha önce açıklandı. Ayrıca bu testlerin eleştirisi yapıldı ve deney sonuçlarının güvenilirliği tartışıldı. Buna rağmen bazı genel değerlendirmelerde bulunmak üzere toplam mikroporozite değeri ve niteliği ile kritik boşluk çaplarının karşılaştırılması Tablo 5.19 da ele alındı.

Tablo 5.19: Tİ ve Hİ koşullarında saklanan çimento hamurlarındaki mikroporozitenin nicelik ve nitelikleri-kritik boşluk çapları.

Saklama koşulu ve S/Ç	Çimento türü	Toplam boşluk hacmi oransal etkinlik	40 nm den ince boşluk		D _{kritik}
			Oran (%)	Oransal etkinlik	
Tİ koşulu 0,25 katkısız	C3	1,00	66,3	1,00	19
	C2	1,42	64,0	0,97	19
	C1	0,91	74,7	1,13	16
Tİ koşulu 0,20 SA katkılı	C3	1,00	89,4	1,00	18
	C2	0,50	96,8	1,08	19
	C1	-	95,3	1,07	35
Hİ koşulu 0,25 katkısız	C3	1,00	76,7	1,00	15
	C2	-	-	-	-
	C1	0,76	88,1	1,14	19
Hİ koşulu 0,20 SA katkılı	C3	1,00	100,0	1,00	15
	C2	-	-	-	-
	C1	0,76	94,7	0,95	25

S/Ç=0,25 Tİ koşulu dışındaki tüm konumlarda D_{kritik} değerleri C1 çimento hamurlarında yüksek değerler almıştır. D_{kritik}'in büyük olması ortamda sıvı akımının daha kolay olmasını sağlar ve hidrasyonun gelişmesi açısından yararlıdır. Toplam porozitenin yüksekliği de bu gelişme açısından olumludur. D_{kritik}'in aksine toplam porozite C3 çimento hamurlarında yüksektir; bu iki niteliğin hidrasyon sürecindeki etkileri C1 ve C3 için ters yöndedir. Öte yandan 40 nm'den ince kılcal boşlukların fazlalığı FKOR'deki fiziksel kontraksiyon gerilmelerinin büyük değerler almasına ve rötrenin hızlanma aşamasında artmasına yol açabilir. S/Ç=0,20, Hİ koşulu dışında bu

incelikteki kılcal boşluklar C1 çimento hamurlarında nispeten yüksektir. Saklama koşullarına bağlı olarak farklılıklar gösteren mikroporozite sonuçları C1 ve C3 ün otojen rötreyi artırma ve kısıtlama açısından değerlendirilmesinde yargıya varmaya olanak vermemektedirler.

Otojen rötreyi dolaylı yoldan etkileyecek hidrasyon özellikleri, yüksek alkalili C3 çimentolarının rötreyi arttırıcı nitelikte olduğunu gösterdiler. Mikroporozite sonuçları ise somut bir karar vermeyi olanaksız kıldı. Hidrasyon ısıları, dereceleri ve enerjilerinin değerlendirilmelerinde özellikle S/Ç oranlarının ve saklama koşullarının etkinlikleri büyük önem taşıdı. S/Ç oranının 0,20'ye inmesi ve SA katılması ile saklama koşulunun Tİ olması sonuçların daha anlamlı sayılarla ifadesine sebep oldular.

Hidrasyon süreci ve kinetiği sonuçları ile Tablo 5.15 de verilen çimento içerikleri ve özellikleri değerlendirmeleri yüksek çözünen alkali içeren C3 çimentolarının FKOR oluşmasında daha etken olacağını kanıtladılar. Sorunu doğrudan doğruya belirlemek ve doğrulamak amacıyla “çimento türü- otojen rötre”karşılaştırmalarının yapılması yoluna gidildi. Bu karşılaştırmalarda hamurlar üzerinde yürütülen hacimsel kısa süreli FKOR ve KOR ölçümleri ve uzun süreli lineer otojen rötre deney sonuçları oransal etkinlikler yardımıyla incelendi ve Tablo 5.20 ve Tablo 5.21 de gösterildi.

Tablo 5.20 kısa süreli hacimsel otojen rötrelerdir. Tİ koşulundaki ve S/Ç=0,20 olan deneylerdeki “rötre-zaman” eğrileri FKOR davranışına uyan ve başlangıç, hızlanma ve yavaşlama aşamaları belirgin eğrilerdir. Tİ koşulunda ve S/Ç=0,25 olan eğriler de ise bu karakteristik FKOR davranışı sadece C2 çimentosunda gözlenebilmişti, bunlarda ve Hİ koşulunda saklanan numunelerde ise eğriler sürekli bir artış şeklinde gerçekleşti.

Tablo 5.20: Tİ ve Hİ koşullarında saklanan çimento hamurlarında oluşan rötrelerin oransal etkinlikleri.

Saklama koşulu ve S/Ç	Çimento türü	1. aşama (başlangıç)		2. aşama (hızlanma)		3. aşama (yavaşlama)	
		Süre (dak)	Oransal etkinlik	Süre (dak)	Oransal etkinlik	Süre (saat)	Oransal etkinlik
Tİ koşulu 0,25 katkısız	C3	150	1,00	615	1,00	24	1,00
	C2	225	1,69	705	0,84	24	0,79
	C1	75	1,01	810	0,84	24	0,77
Tİ koşulu 0,20 SA katkılı	C3	300	1,00	690	1,00	24	1,00
	C2	300	1,32	660	1,06	24	1,06
	C1	270	1,29	630	1,00	24	1,00
Hİ koşulu 0,25 katkısız	C3	240	1,00	600	1,00	24	1,00
	C2	240	2,18	600	1,18	24	1,12
	C1	240	2,09	600	1,18	24	1,11
Hİ koşulu 0,20 SA katkılı	C3	240	1,00	600	1,00	24	1,00
	C2	240	3,22	600	0,59	24	0,99
	C1	240	2,78	600	0,80	24	0,84

Tablo 5.20 nin incelenmesinden oldukça karmaşık sonuçlar çıkmaktadır. Başlama aşaması sayılabilecek 1. aşamada düşük alkalili çimentoların (C1 ve C2) hamurları çok yüksek rötreler yapmaktadırlar, bu aşamada fiziksel rötre büyük ölçüde devreye girmemektedir ve rötrelerin çok büyük kısmı kimyasaldır (KOR). Ancak 2. aşamada sonunda FKOR etkin hale geçmektedir. Bu aşamada ve yavaşlama aşaması kabul edilecek 3. aşamada S/Ç=0,25 durumlarında rötre artışında etkinlik C3 (yüksek alkalili) çimento hamuruna geçmektedir. Yine Tİ koşulunda ve S/Ç=0,20 olduğunda 2. ve 3. aşamalarda C1,C2,C3 çimento hamurlarının rötre üzerindeki etkinlikleri eşit olmaktadır. Hİ koşulunda da S/Ç=0,25 iken C1 ve C2 daha etkin oluyor, ancak S/Ç=0,20 halinde 2. ve 3. aşamalarda C3 daha etkin oluyor. Bu kısa süreli hacimsel rötre ölçümlerinde C3'le üretilen harçların daha yüksek rötre geliştirmesi 2. ve 3. aşamalarda (hızlanma sonu, yavaşlama sonu) olabilmektedir. Birinci aşamada C1 ve C2 nin hem Tİ hem de Hİ koşulunda yaptıkları rötrelerin yüksek olduğu düşünüldüğünde ve Hİ koşulunda ölçülen rötrenin kimyasal kökenli olduğu dikkate alındığında elde edilen sonuçlar 1. aşamada ortaya çıkan rötrenin daha çok kimyasal kökenli olduğunu ortaya koymaktadır. Zira 2 ve üçüncü aşamalarda C1 ve C2 nin kor etkinliği C3 çimentosununkine oranla yüksek olmasına karşın C3 çimentosu daha

yüksek FKOR yapmıştır. Bu sonuç da 2 ve 3. aşamalarda fiziksel boyutun etkin olduğunu kanıtlamaktadır.

Uzun süreli lineer rötre ölçümleri de C3'nin büyük otojen rötreye sebep olduğu daha kesin bir şekilde kanıtlanmaktadır. Tablo 5.21 de bu husus gösterilmiştir.

Tablo 5.21: Tİ koşulunda uzun süre saklanan prizmatik çimento hamur numunelerinin otojen rötreleri ve çimentolara göre oransal etkinlikleri.

Saklama koşulu ve S/Ç	Çimento türü	2 günlük sonuçlar		30 günlük sonuçlar		100 günlük sonuçlar	
		Değer (μD)	Oransal etkinlik	Değer (μD)	Oransal etkinlik	Değer (μD)	Oransal etkinlik
Tİ koşulu 0,25 katkısız	C3	1205	1,00	1820	1,00	1848	1,00
	C2	560	0,46	1200	0,66	1255	0,68
	C1	865	0,72	1135	0,62	1140	0,62
Tİ koşulu 0,20 SA katkılı	C3	2260	1,00	2835	1,00	2835	1,00
	C2	2155	0,95	2763	0,97	2722	0,96
	C1	2150	0,95	2300	0,81	2328	0,82

Tablo 5.6 daki sonuçlarda 2 günlük sonuçların 100 günlük sonuçlara olan yakınlıkları dikkate alınırsa, çok düşük S/Ç oranları ile üretilen bu hamurlarda fiziksel kontraksiyon gerilmelerinin başlangıçta olduğu söylenebilir. Böylece bu toplam rötrelerin büyük kısmının başlangıçta ortaya çıkan FKOR olduğu kabul edilmelidir. C3 çimentosunun tüm numunelerde en yüksek rötre miktarıdır. Aradaki farklar büyük ölçüde, ilk 48 saatte ortaya çıkan rötrede kaynaklanmaktadır. Alkalisi yüksek C3 çimentosu ile üretilen numunelerin erken yaşlarda yaptığı yüksek miktardaki FKOR, bu numunelerin FKOR'lerinin ileri yaşlarda da yüksek olmasına sebep olmaktadır.

Çimento bileşenlerinin terkihi, hidrasyon sürecindeki rötre artırıcı etkinlikler ve özellikle lineer rötre ölçümlerinin somut ve pozitif değerleri dikkate alındığında çözünen alkali içeriği yüksek çimentolarla üretilen düşük S/Ç oranlı ürünlerin daha çok otojen rötre yapacakları kanıtlanmıştır. Ancak otojen rötreleri düşük çimentolu ürünlerin bu niteliği sadece çözünen alkali içeriğine bağlı kabul edilemez, zira kullanılan C1 çimentosu C_3A, C_4AF içerikleri, SO_3^- /çözünen alkali oranı gibi faktörlerin de olumlu etkisine sahiptir. Ancak inceliğin doğurabileceği olumsuz etki bertaraf edilmiş sayılmalıdır. Ayrıca çimentodaki çözünen alkali içeriğinin oransal

etkinlik değerinin diğer faktörlere göre çok yüksek olması, bu faktörün daha önemli ve etkin varsayılmasını desteklemektedir. S/C oranının çok önemli olduğu ve %5 mertebesindeki bir küçük değişmenin sonuçları tamamen değştirebildiği de görüldü.

5.6. Fotogrametrik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

5.6.1. Fotogrametri ile sonuçların elde edilmesi

Fotogrametrik çalışmalar yeryüzünün topografik yapısını elde etmek için başlamıştır. Günümüzde fotogrametri bu amaç dışında birçok yeni uygulama alanında kullanılmaktadır. Fotogrametri genel anlamda havadan ve yerden çekilen resimler üzerinde ölçme, yorumlama ve değerlendirme yapılmasına olanak veren bir bilim dalıdır. Fotogrametrinin temel olarak ölçmelerin doğrudan doğruya cisim üzerinde yapılması yerine, cismin üç boyutlu modeli üzerinde dolaylı olarak yapılmasına olanak vermektedir (**Bashir, 1999**) .

Dijital fotogrametrik ölçümler için dijital kameralar kullanılmaktadır. Dijital kameralar birçok temel parçadan oluşur ve bu ana parçaların herbiri ölçülen büyüklüğün doğruluğu üzerinde bir etkidir.

Güvenilir sonuçlar alınması açısından kameraların kalibrasyonları oldukça önemlidir. Kalibrasyon sistemi basit olarak geometrik olarak idealleştirilmiş imajinasyon sisteminden geometrik sapmaların belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Genellikle şekillerle bu şekillerin görüntüleri arasındaki ilişkinin geometrik bir modeli kullanılmakla birlikte lens sistemi ve sensörlerin de dikkate alınması gerekmektedir.

Kullanılan temel matematik model kolinearite modelidir. Bu model basitçe şöyle tanımlanabilir; nesne uzayındaki bir nokta, bu noktanın resim düzlemindeki karşılığı ve projeksiyon merkezi bir doğru üzerinde bulunurlar. Kolinearite modeli eşitlik 5.2 ve 5.3 ve Şekil A de gösterilmektedir (**Remondino 2002**).

$$x - x_0 = -c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = -c \cdot \frac{U}{W} \quad (5.2)$$

$$y - y_0 = -c \cdot \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = -c \cdot \frac{V}{W} \quad (5.3)$$

burada;

x ve y :P noktasının görüntü koordinatları

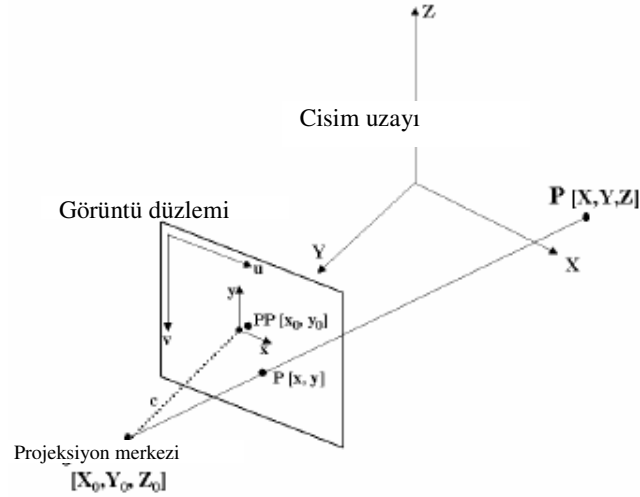
x_0 ve y_0 :Başlıca noktanın (PP) imaj koordinatları

c :Kamera sabiti

X, Y, Z :Nokta koordinat sistemi cisim koordinatları (P)

X_0, Y_0, Z_0 :Projeksiyon merkezinin koordinatları

r_{ij} :Görüntü ve nesne uzayı koordinat sistemi arasındaki ortogonal dönüşüm matrisinin bileşenleri



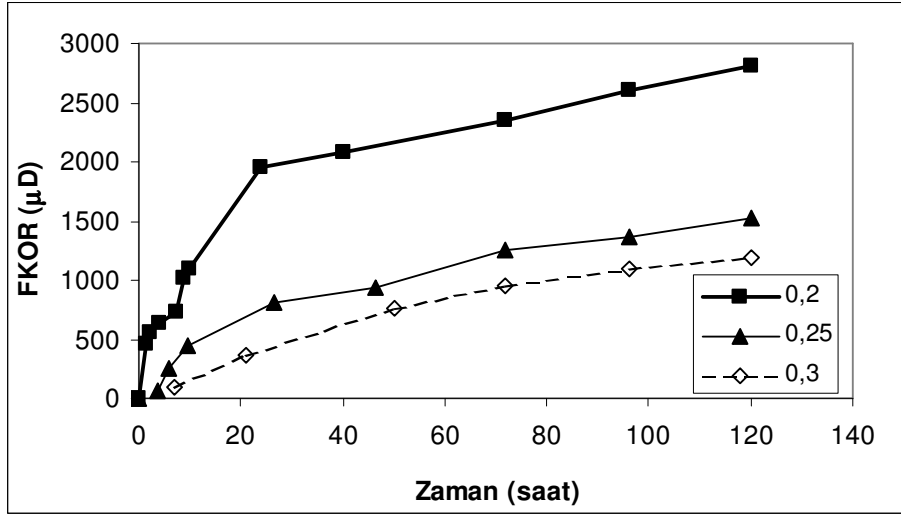
Şekil 5.22: Kolinearite modeli ve referans sistemleri

Bu modelin ideal koşullarda geçerli olduğu unutulmamalıdır. Pratiğe uygulayabilmek ve oluşabilecek hataları hesaplarda değerlendirebilmek için düzeltme terimleri kullanılır (Remondino, 2002).

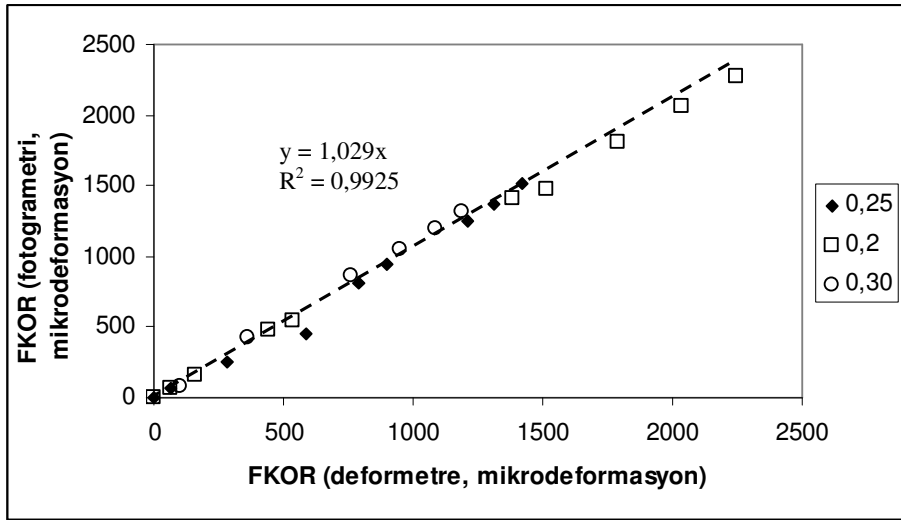
5.6.2. Fotogrametri ile elde edilen deney sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması

5.6.2.1 Lineer ölçümlerin karşılaştırılması

Fotogrametrik ölçümler sonucunda elde edilen rötre değerleri, deformetre ile elde edilen lineer ölçüm sonuçları ile birlikte su/çimento oranları 0,20 ve 0,25 ve 0,30 olan çimento hamurları için Tablo 4.30-4.32 de verilmişti. Bu çimento hamurlarında fotogrametri ile elde edilmiş FKOR miktarları Şekil 5.22 de gösterilmiştir. Sonuçları karışım anından itibaren elde etmek rötre gelişimini belirleyebilmek ve büyük kısmı başlangıçta oluşan FKOR nin önemli kısmını gözden kaçırılmaması açısından büyük bir avantajdır. Sonuçların tutarlılığı ve geleneksel yöntem olan deformetre ile karşılaştırılması yöntemin uygulanabilirliği konusunda önemlidir. Şekil 5.23 de aynı seri numunede aynı zamanlarda ve aynı çevresel şartlarda (20 °C klimatize oda) fotogrametri ve deformetre ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 5.23 de grafikte x eksenine deformetre ile elde edilen sonuçlar koyulmuş, y ekseninde ise aynı anlarda alınan fotogrametrik sonuçlar yer almıştır. İki yöntemden elde edilen sonuçların bir doğru üzerinde yer alması her iki yöntemin birbiri ile tutarlılık içinde çalıştığının kanıtıdır. Ancak fotogrametri ile ölçülen FKOR değerleri her zaman deformetre ile ölçülen değerlerden %3 civarında daha yüksek çıkmaktadır. Fotogrametri ile elde edilen sonuçların daha yüksek olması diğer numunelerde oluşabilecek bir izolasyon problemini akla getirmektedir. Deformetre ile ölçülen numuneler ölçüm pulları yapıştırılacağı zaman açılmakta ve pulların yapıştırılmasından sonra tekrar izole edilmektedirler. Bu aşamada izolasyonun bozulması bir miktar su buharlaşmasına neden olabilir ve bu olay da sonuçlara kuruma rötresi olarak yansiyabilir.



Şekil 5.23: Fotogrametrik yöntem ile elde edilmiş lineer FKOR değerleri



Şekil 5.24: Deformetre ve fotogrametri ile elde edilen FKOR değerleri karşılaştırılması

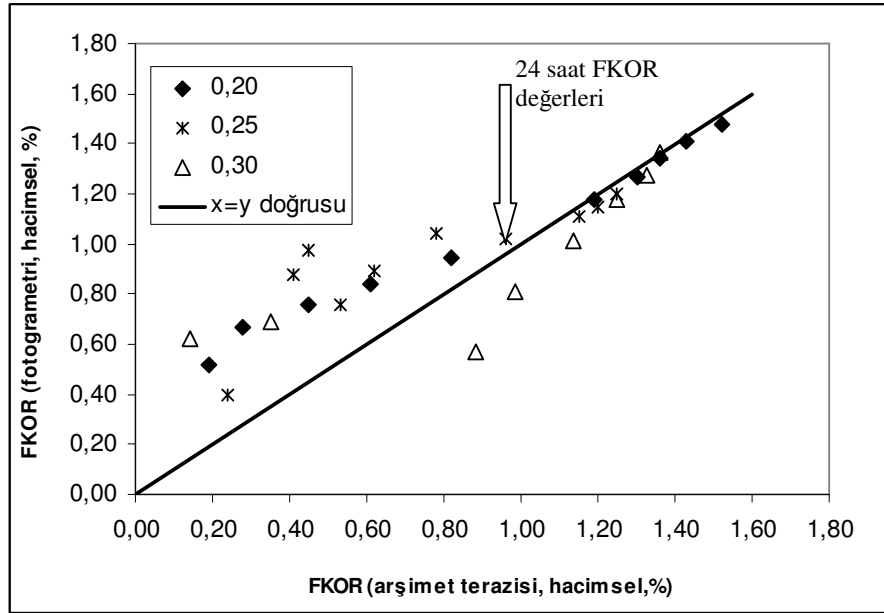
Elde edilen sonuçlardan, fotogrametrik ölçüm yönteminin, denenen su/çimento oranlı hamurlarda uygulanan numune boyutlarında sağlıklı olarak çalıştığı anlaşılmaktadır. Otojen rötre literatüründe numuneye temas etmeksizin yapılan ölçümler grubunda bulunan lazer ile ölçüm sistemine bir alternatif olarak düşünülebilir. Ancak tek başına bir ölçüm yöntemi olarak kullanılmaya başlanmadan önce daha fazla numune ile ve değişik çimentolarla da çalışma yapılmalıdır. Deneysel çalışmalar sırasında yüksek su/çimento oranlı (>0,30) hamurlarda hamurun terleme yapması nedeniyle

hedef noktalarının terleme suyu altına battığı belirlenmiştir. Bunun sonucunda bu numunelerde okuma yapmak mümkün olmamıştır. Yüksek su/çimento oranlı numuneler için yeni hedef noktası detayları denenebilir.

5.6.2.2 Hacimsel ölçümlerin karşılaştırılması

Prizmatik kalıplar içindeki hamur numunelerin hacimlerindeki değişme, fotogrametrik ölçülerden üç boyutlu elde edilen şekil değiştirmelerden faydalanarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu hacimsel değişimler, otojen rötre ölçümünde yaygın olarak kullanılan arşimet terazisi yönteminden elde edilen sonuçlarla Şekil 5.24 de karşılaştırılmıştır.

Şekilde x ekseninde arşimet terazisi ile elde edilen FKOR değerleri verilirken y ekseninde fotogrametri ile elde edilmiş FKOR değerleri gösterilmektedir. Şekilde ayrıca her iki yöntemden elde edilen sonuçların eşit olması durumunda noktaların üzerinde sıralanması beklenen $x=y$ doğrusu da gösterilmektedir. Hacimsel sonuçların karşılaştırılmasında lineer sonuçlarda elde edilen net ilişki, burada belirlenememiştir. 24 saate kadar olan aşamada fotogrametri ile ölçülen hacimsel FKOR değerleri arşimet yöntemiyle ölçülenlere göre hayli yüksek değerler almaktadır. Değerler 24 saatten sonra çakışmakta ve birliktelik göstermektedir. Bu sonuç değerlendirilirken, numune boyutlarının ve numunelerin saklandığı ortamların zorunlu olarak farklı olduğu dikkate alınmalıdır. Fotogrametrik deneylerde kullanılan numune kütlece diğer numunenin yaklaşık 8 katı büyüklüğündedir. Hidratasyonun erken aşamalarında bu iki numune içindeki sıcaklığın farklı olacağı açıktır. Bu da hidratasyonları değişik yönlerde etkileyebilir. Bunun yanında, taze haldeki hamurun büzülme davranışında şekil ve boyut etkisi de önemli bir faktör olabilir.



Şekil 5.25: Arşimet terazisi ve fotogrametri ile elde edilen hacimsel FKOR değerlerinin karşılaştırılması.

5.6.3 Lineer ve hacimsel fkor ilişkisi

Otojen rötire üzerindeki çalışmalar başladığından beri iki tür ölçüm sistemi üzerinde çalışıldığı daha önce belirtilmişti. Bazı araştırmacılar deneylerini lineer yöntem ile yaparken bazıları hacimsel yöntemi kullanmaktadırlar. Hacimsel yöntem, deney tekniği bakımından oldukça kolaydır. Bunun yanında lineer yöntem yapısal elemanlara yaklaşım yapmak bakımından önemlidir. Dolayısıyla hacimsel sonuçları lineer sonuçlara çevirmek arzu edilmektedir. Her iki yöntemden elde edilen sonuçların mukayesesi mümkün değildir. Bundan dolayı lineer otojen rötire ile hacimsel otojen rötire arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek önemlidir. Bu ilişkiyi elde edebilmek için her bir eksenindeki şekil değiştirmenin hacimsel büzölmeye yaptığı katkının belirlenmesi yoluna gidildi. x, y, ve z eksenlerindeki şekil değiştirmenin toplam hacimsel FKOR ye etkileri (%) olarak hesaplandı. Her bir eksenin toplam hacimsel rötireye etkisi Eksen Etki Faktörleri (EEFi) ile gösterildi. Bir eksenin etkilenen eksen etkisi (EEFi), o eksenindeki deformasyon sıfır kabul edildiğinde hacim azalmasında meydana gelen azalma (%) olarak tanımlandı. Yani bir zaman dilimi içinde 1 birim olarak elde edilen hacimsel azalma, i eksenindeki deformasyon sıfır kabul edildiğinde a değerini alıyorsa, $EEFi=100*(1-a)$ olarak hesaplandı. Su /çimento

oranları 0,20, 0,25 v 0,30 olan çimento hamurları için EEFi değerleri sırasıyla Tablo 5.22, 5.23 ve 5.24 de verilmiştir.

Üç tabloda da göze çarpan en belirgin eğilim ilk saatlerde FKOR nin çok büyük bir kısmının z ekseninde gerçekleştiğidir. Çimento hamuru yerçekiminin etkisiyle düşey doğrultuda hareket etmektedir. Ancak z ekseninde meydana gelen büzülmenin toplam hacim azalmasına etkisi, zaman ilerledikçe üç numune için de azalmaktadır. X ve y eksenlerinde ise aksi yönde bir gelişim söz konusudur. Bu eksenlerin toplam hacimsel büzülmedeki payları başta küçük değerler alırken zamanla artmaktadır. Çimento hamuru taze halden sertleşmiş hale geçerken dayanımı artmakta ve bu doğrultudaki deformasyonlara olanak vermektedir. 120. saatte x ekseninden EEF_x (lineer FKOR) 0,20, 0,25 ve 0,30 su/çimento oranlı hamurlar için sırasıyla 19,0, 10,5 ve 14,5 olmaktadır. Bu da S/Ç oranları 0,20-0,30 aralığında olan çimento hamurları için başlangıçta %0-%10 arasında olan lineer FKOR/hacimsel FKOR oranının 72 saat sonunda %10-%20 arasında değiştiğini göstermektedir.

Tablo 5.22: 0,20 su/çimento oranlı hamurda eksen etki faktörleri

Zaman (saat:dakika)	EEF_x (%)	EEF_y (%)	EEF_z (%)
1:20	0,0	0,0	100,0
2:20	8,2	0,0	91,2
4:00	8,2	6,2	85,4
7:20	8,3	9,6	91,5
9:00	10,4	20,0	68,9
24:00	16,6	19,2	64,4
40:00	16,2	18,8	64,7
72:00	16,8	19,4	62,8
96:00	17,9	20,2	61,9
120:00	19,0	20,2	60,9

Tablo 5.23: 0,25 su/çimento oranlı hamurda eksen etki faktörleri

Zaman (saat:dakika)	EEF_x (%)	EEF_y (%)	EEF_z (%)
1:15	6,3	75,5	19,3
3:00	4,5	37,6	58,2
3:30	4,4	44,1	51,8
6:00	6,0	31,1	63,3
9:30	5,3	47,5	47,0
26:30	8,0	38,1	53,2
46:30	7,6	38,0	54,5
72:00	8,1	40,8	50,4
96:00	10,0	40,8	49,2
120:00	10,5	41,3	47,4

Tablo 5.24: 0,30 su/çimento oranlı hamurda eksen etki faktörleri

Zaman (saat:dakika)	EEF_x (%)	EEF_y (%)	EEF_z (%)
1:15	9,6	14,3	75,0
3:30	10,1	19,5	70,9
7:00	5,5	33,4	60,4
21:30	10,8	30,4	58,0
50:00	11,9	31,8	55,1
72:00	13,6	35,5	50,6
96:00	14,1	36,6	48,8
120:00	14,5	37,4	47,2

Fotogrametrik ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda genel olarak elde edilen bulgular aşağıda özetlenmektedir:

Fotogrametrik ölçüm tekniği ile lineer ölçümlerde elde edilen sonuçlar geleneksel ölçüm tekniği deformetre ile elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir. Fotogrametrinin geleneksel yöntemle olan üstünlüğü numuneye herhangi bir temas olmaksızın ölçüm olanağı sağlamasıdır. Böylece taze haldeki numune üzerinde lineer rötre ölçümü yapmak olanaklı hale gelmektedir. Zira yapılan ölçümler sonucunda FKOR'nin erken yaşlarda ortaya çıkan karakteristik eğrisi elde edilebilmiştir. FKOR'nin önemli bir kısmının numune taze haldeyken ortaya çıktığı düşünüldüğünde fotogrametrik ölçümlerin bu alanda önemli faydalar sağlayacağı anlaşılmaktadır. Fotogrametrik ölçümlerle elde edilen hacimsel rötreler arşimet terazisinde elde edilen sonuçlarla 24 saatten sonraki ölçümler için çakışmaktadır. Her iki yöntemde ölçüm yapılan numunenin farklı boyutlarda olduğu ve zorunlu olarak farklı ortamlarda saklandığı belirtilmişti. Ancak bu konuda yapılacak daha geniş bir çalışmayla hacimsel rötre ile

lineer rötre arasında bir bağıntı elde edilebilir ve daha basit bir yöntem olan arşimet terazisi yönteminden elde edilen FKOR sonuçları lineer boyulara çevrilebilir ve pratikte uygulama olanağı ortaya çıkabilir. Son olarak numunelerde her üç boyutta ortaya çıkan deformasyonlar belirlenmiş ve herbir eksenindeki deformasyonun hacim değişimindeki etkisi bulunmuştur. İlk saatlerde düşey ekseninde olan etki üstünlüğünün zamanla azalmıştır. Zaman ilerledikçe yatay eksenlerin hacim değişimindeki etkilerinin arttığı tespit edilmiştir.

6. GENEL SONUÇLAR

Otojen rötrenin varlığı 1904 de ilk Le Chatelier tarafından ortaya atılmıştı. Çimento hamuru üzerine yerleştirdiği su dolu bir tüpteki hacim azalmasını ölçerek karışıma katılan çimentonun mutlak hacmi ve su hacminin toplamının hidratasyon sonunda azaldığını saptadı. Oluşan rötreye bünyesel (intrinseque) adını verdi. Bu rötreye herhangi bir dış etkiye maruz kalmayan kendi içinde oluşan bir rötreydi ve tamamen hidratasyon sonucunda meydana geliyordu. Bu rötrenin dışsal olarak bir büzülmeye yol açıp açmadığı araştırılmadı ve uzun yıllar konuyla ilgilenen olmadı. Ancak çok yüksek dayanımlı, yüksek performanslı betonların üretimiyle güncel bir konu haline geldi. Bu betonlarda S/Ç oranının çok düşük olması gerekiyordu. Bu betonların üretimiyle düşük S/Ç oranı nedeniyle ortaya çıkan fiziksel etkenin de dahil olmasıyla betonların kendiliğinden büzülmesi dikkate değer boyutlara ulaştı ve konu tekrar önem kazandı.

Otojen rötreye adı verilen bu yeni rötrenin bünyesel rötreden farklı yönleri olduğu görüldü. Özellikle karışımın ilk gününde ortaya çıkan bir bileşene sahip olduğu saptandı. Oldukça düşük değerde olan bu bileşen rötreye, bünyesel rötreden farklı bir ikinci nedene, kendiliğinden kuruma (self dessication) de dayanıyordu. Gerçi bu ikincil rötreye de bünyesel rötreye gibi hidratasyona bağlı idi. Ancak hidratasyonun katılaştırdığı ve kılcal boşluklar yarattıktan sonra devamı için bu boşluklardaki suyu çekerek kılcal borularda mensikler ve negatif basınçlar oluşturarak fiziksel bir etkiyle katılmış fazı büzüyordu.

Çalışmamızda düşük su/çimento oranlı çimento hamurları harçları ve betonları üzerinde oluşan bu ikincil rötreye fiziko-kimyasal otojen rötreye (FKOR) adı verilerek incelenmeye alındı, salt hidratasyondan kaynaklanan bünyesel rötrenin dışsal şekline ise kimyasal otojen rötreye (KOR) denildi.

FKOR'ye etkiyen faktörler ortam şartları, su/çimento oranları, hidratasyon süreç ve kinetiği, içyapı, boşluk yapısıdır. Bunlarla beraber bağlayıcı faz olan çimentonun

bileşimi hidrasyon kinetiğine ve sürecine ve boşluk yapısına etkiyerek önemli bir etki faktörü olmaktadır. Çimento bileşimindeki çözünen alkalilerin miktarı, C_3A , C_4AF , SO_3^- içerikleri ve çimentonun inceliği, otojen rötreye etkiyen faktörler olmaktadır.

Ortam şartlarının gerçekleşmesi, rötrelerin tam olarak ölçülebilmesi için gerekli bir koşuldur. Bu koşullar sonucunda buharlaşma, su ve buhar girişi, sıcaklık değişimleri tamamen önlenmektedir; yani numuneler suya havaya karşı izole edilmeli ve izotermal dış ortamda saklamalıdır. Bu çalışmada deneyler bu koşulları gerçekleştirecek şekilde yürütüldü, ayrıca çimento bileşenlerinin etkisini ortaya çıkarmak üzere özellikle farklı çözünen alkali içeriğine sahip üç cins çimento kullanıldı. Su ve havaya karşı tam izolasyon (Tİ) koşulu ile birlikte Le Chatelier sistemine göre sadece havadan izole edilmiş ve su ile kaplı (Hİ koşulu) da kullanıldı. Araştırmada ana konu olarak düşünülen çözünen alkali içeriğinin etkisi ortaya çıkarılmaya çalışıldı.

Öncelikle klasik beton ve çimento deneyleri yapıldı ancak çimento deneylerinin kimyasal deneyler bölümünde kullanılan çimentoların çözünen alkalilerinin ayrıca tespitine çalışıldı ve atomik absorpsiyon deneylerine de başvuruldu. Ve kullanılan çimentolarda bu değerler toplam Na_2O ve K_2O olarak şöylece tespit edildi: C1 çimentosunda 0,426 , C2 çimentosunda 0,630 , C3 çimentosunda 0,847 g/100g – çimento.

Hacimsel rötre ölçümleri çimento hamurları üzerinde Tİ ve Hİ koşullarında kısa süreli olarak arşimet prensibine ve Le Chatelier prensibine göre yürütüldü. Ayrıca hamurlar, harçlar ve mikrobetonlar üzerinde lineer ölçüler Tİ koşulunda sürdürüldü. Lineer ölçüler 100 gün süreyle devam etti. Kısa süreli deneyler ise 24 saatte tamamlandı ancak 28 gün sonraki durum da kontrol edildi.

Rötre olaylarında birinci etkenin hidrasyon kinetiği ve süreci olduğu dikkate alınarak detaylı hidrasyon deneyleri yürütüldü. Bu deneylerde özellikle rötrenin oluştuğu sürelerdeki hidrasyon derecelerinin tespiti için bu sürelerde 2-propanol katarak hidrasyon durduruldu ve bu durdurma işleminin geçerliliği ayrıca denetlendi. Sadece hidrasyon dereceleri ile yetinilmeyerek hidrasyon ısıları da 15 dakika arayla hidrasyon süreci devamınca semi-adiabadik kalorimetre yardımıyla saptandı. Ayrıca 28 gün sonunda standarda uygun olarak da tespit edildi. Bu

sonuçlardan yararlanarak hidratasyon ısısı enerjisinin zaman içinde ne şekilde arttığı ve maksimum değerinin hangi zaman zarfında meydana geldiği hesaplandı. Bütün bu hidratasyon deneylerinin yapılmasındaki amaç FKOR rötresinde iki ana neden olan hidratasyon kinetiği ve onun yarattığı kılcal boşluk yapısını ortaya çıkarabilmektir. Bu ikinci amaç düşük su/çimento oranlarıyla üretilen çimento hamurlarında teşekkül eden iç yapının incelenmesiyle görülmek istendi ve İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesindeki MIP (Mercury Intrusion Porosimetry) aletiyle sertleşmiş çimento hamurlarının boşluk yapısı incelendi.

Bu çalışmada ayrıca lineer rötire deformasyonlarının ölçülmesi için bir metod geliştirilmek istendi ve fotogrametri yöntemlerinden yararlanıldı. Ayrıca ölçüm noktalarının sadece bir doğrultuda değil uzayın üç doğrultusunda da deplasmanları vermesinden yararlanılarak lineer ve hacimsel rötire değerleri arasındaki ilişkiler elde edildi.

Yapılan deneyler sonucunda varılan genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Kısa süreli deneylerde çok düşük su/çimento oranıyla ($S/\Ç=0,20$) ve SA katkı kullanarak Tİ koşulunda yapılan hacimsel rötire deneylerinde karakteristik bir davranış elde edilmiştir. Rötire üç aşamada olmaktadır. Bu aşamaların birincisine başlama aşaması, ikincisine hızlanma, üçüncüsüne yavaşlama adı verilmektedir. Aşamalar belirgin büküm noktalarıyla ayrılmaktadır. Başlangıç süresinde rötireler azalan hızla artmakta, hızlanma aşamasında lineer bir hızla bu artış meydana devam etmekte, yavaşlama aşamasında ise çok az bir artış oluşmaktadır. Her üç çimentoda da bu davranış vardır. Ancak FKOR nin bu karakteristik davranışı su/çimento oranı çok az yükseldiğinde ($S/\Ç=0,25$) genellikle meydana gelmemektedir. Bu karakteristik davranış $S/\Ç=0,25$ durumunda sadece bir çimentoda oluşabilmiştir. Herne kadar bu davranışların süperakışkanlaştırıcı kullanımıyla ilgili olduğu bazı araştırmacılarca öne sürülmekte ise de asıl etkenin su/çimento oranının küçüklüğünde ve koşulun tam izolasyon (Tİ) olması durumunda tespit edilmiştir. Hİ koşulunda yapılan $S/\Ç=0,25$, $S/\Ç=0,20$ konumlarında eğri sürekli olarak artan büküm noktalarına sahip olmayan bir eğri formundadır. Bu eğrinin aşamalarında kendiliğinden kuruma faktörü hızlanma aşamasında belirginleşmektedir. Buna karşılık, KOR rötresi tüm aşamalarda da vardır. Bu yüzden FKOR'ye fizikokimyasal adı uygun görülmüştür. Başlangıç aşamasında ortam katılaşmamıştır. Hidratasyon sürmekte ve kılcal boşlukların oluşmasına katkıda bulunmaktadır. Hızlanma

aşamasına geçildiğinde ortam sertleşmiştir ancak düşük dayanımlıdır ve kılcal boşluklardaki serbest su çekilerek katılaşmış fazı fiziksel olarak büzmektedir. Yavaşlama aşamasına geçildiğinde serbest su miktarı çok azalmış ve kuvvetle tutulmaktadır. Hidratasyon için gerekli su çekilememektedir, ve hidratasyon belirgin biçimde yavaşlamıştır. Burada FKOR nin toplam değerinin çimentolardan etkilenme düzeyleri 0,25 su/çimento oranlı durumda en çok C3 ve en az C1 de olmaktadır. Ancak su/çimento oranı 0,20 olduğunda ve özellikle SA katılımı durumunda bu durum değişmekte, farklar anlamlı düzeyde olmamaktadır.

2. Kısa süreli otojen rötre deneylerine tabi tutulmuş hamur numuneleri üzerinde yapılan hidratasyon derecesi deneyleri hidratasyonun gelişmesi açısından ilginç sonuçlar vermiştir. Kimyasal rötrenin belirgin olduğu ilk aşamada hidratasyon dereceleri hızla yükselmekte daha sonraki aşamada giderek yavaşlamakta ve yavaşlama bölgesine varıldığında sabit sayılabilen bir değere varmaktadır. İlginç bir husus elde edilen nihai hidratasyon derecesinin değerinin oldukça küçük bulunmasıdır. Bu değerler $S/C=0,25$ için; %47 ile %51 arasındadır ve her çimentonun değerleri hemen hemen eşittir. SA içeren ve $S/C=0,20$ olanlarda ise bu değerler daha düşüktür ve %36 ve %48 arasındadır ve en düşük değer C1 çimentosuna aittir. Burdan çıkarılan en önemli sonuç çok düşük su/çimento oranı ile üretilen bu ürünlerin basınç mukavemetleri çok yüksek olmakla beraber hidratasyonları çok düşüktür, yani çimentoların çoğu anhidr durumda kalmıştır ve filler fonksiyonu görmektedirler.

3. Hidratasyon ısılarının oluşumu da hidratasyonun gerçekleşmesini belirten değerlerdir. S/C oranı düşük ve katkı içeren hamurlarda toplam hidratasyon ısısı ve her aşamada ölçülen hidratasyon ısıları daima yüksek S/C oranlı hamurlardan düşüktür. Bunların zaman içindeki değerleri (birim zamanda salınan hidratasyon ısısı) bir maksimumdan geçmektedir. Bu maksimumun değeri ve zaman ölçeğindeki yeri önemli bir sonuç vermektedir. Bu maksimum değer ısı değerlerinin gelişmesinden farklı bir oluşum göstermektedir. Maksimum değerler süperakışkanlaştırıcı içeren düşük S/C oranlı karışımlarda daha yüksektir ve zaman ölçeğinde başlangıçtan uzaklaşmaktadır. Diğer önemli bir husus, maksimumun zaman ölçeğindeki yeri hızlanma aşamasının ortasına isabet etmektedir. Bu da fiziksel rötrede etkinliğin arttığı hızlanma bölgesinde de hidratasyon faktörünün önem taşıdığını ifade etmiştir. Maksimum değer, $S/C=0,25$ ve $S/C=0,20$

konumlarında ve C3 kullanılması halinde daha yüksek değerler almaktadır. Ancak SA katılması halinde çimentolar arasındaki maksimum değerlerin farkı giderek artmaktadır. Bu faktörün (birim zamanda salınan hidrasyon ısı) büyük olması hidrasyonun o bölgelerde daha belirgin gerçekleşeceğini ve bu suretle rötre oluşumunu arttırma yönünde etki yapacağını göstermektedir.

4. Uzun süreli lineer deneylerde Tİ koşulları gerçekleştirilmeye çalışıldı. Ancak ilk 24 saat içinde ölçüler alınamadı. Bu nedenle FKOR nin karakteristik davranışlarının varlığı görülemedi. Ancak iki günlük rötre sonuçlarıyla 100 günlük rötre sonuçları karşılaştırıldığında S/Ç oranı düşük ve SA içeren numunelerde iki günlük rötrelerin 100 günlük rötreye oranlarının çok yakın olduğu (%80 ve %93 arasında) görüldü. Bu durum bu numunelerde başlangıçta FKOR'nin etkin olduğunu kanıtlamaktadır. S/Ç oranı arttığında ise 2gün/100 gün rötre oranı düşmekte bu yaklaşım kaybolmaktadır.

5. Uzun süreli deneyler hamur, harç ve mikrobetonlar üzerinde de yapılmıştır. Harç ve betonların çimento fazlarını oluşturan hamurlar üzerinde de deneyler yürütüldü. Hamur üzerinde yapılan deneylerle harç ve betonların deneyleri arasında picket bağlantısına uyulup uyulmadığı incelendi. Çimento türü dikkate alınarak bu tür bir bağlantının otojen rötrelere de kurulabileceği sonucuna varıldı ve böyle bir yaklaşımda picket formülünde agrega mutlak hacmini içermeyen (1-a) faktörünün katsayısının 1,4 ile 2,0 arasında değişebileceği görüldü.

6. Otojen rötre üzerine etkiyen hamur yapısının boşluk durumunun belirlenmesi ve bu rötrenin FKOR aşamasında rol oynayan ince kılcal boşlukların varlığının ve niteliklerinin bulunmasında görüş sunmak amacıyla civalı mikroporozite deneyleri yapıldı. Boşluk yapısının çok ince olduğu ve 40 nm çapından ince kılcal boşlukların miktarının çok yüksek olduğu, özellikle Tİ koşulunda saklanıp S/Ç oranı 0,20 olması durumunda toplam porozitenin %90 ve %95'i mertebesinde bulunduğu gözlemlendi. Bu oranların su/çimento oranı yükseldiğinde düştüğü belirlendi. Bu oranın artmasının FKOR büyüklüğünün artmasında etkili olduğu saptandı. Ancak kritik çap bakımından ve boşlukların dağılım düzeni bakımından net sonuçlara varılamamıştır.

7. Değişik S/Ç oranlı hamur numuneler üzerinde fotogrametrik yöntemle de ölçümler yürütülmüş ve elde edilen sonuçlar lineer ve hacimsel rötre sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Fotogrametri ile ölçülen lineer deformasyonlar deformetre ile ölçülen sonuçlarla birebir örtüşmektedir. Numuneye temas etmeksizin ölçüm yapma

imkanı veren fotogrametrik yöntem lineer otojen rötre  l   m  için yeni bir teknik olarak önerilebilir. Bu sayede üretim anından itibaren otojen rötreyi elde etme imkanı elde edilebilecek ve başlangıçta numune sertle memi ken ortaya çıkacak rötre lineer  l   mlerde gözden ka ırılmayacaktır.

8. Fotogrametrik yöntemle elde edilen üç boyutlu sonuçlarda herbir eksenindeki  ekil değiştirme zamana göre elde edilmiştir. Çok erken ya larda,  imento hamuru henüz sertle memi  haldeyken ortaya çıkan deformasyonun çok büyük bir kısmının düşey ekseninde ortaya çıktığı belirlenmiştir. Diğer yatay eksenlerdeki deformasyonlar hamur sertle meye ba ladıktan sonra daha etkin hale gelmektedirler. Üç boyutlu  l   m yardımıyla, lineer ve hacimsel rötre arasındaki ilişki yaklaşık olarak elde edilmiştir. Ancak her iki yöntemden elde edilen hacimsel sonuçların erken ya larda  aki maması, daha sağlıklı sonuçlar elde edebilmek bakımından çevresel şartları e itlenmi  paralel sistemlerde bu konuda ileri çalışmalar yapılmasını gerektirmektedir.

9. Bu araştırmanın esas amaçlarından biri çözünen alkali içeriğinin otojen rötre oluşmasındaki etkisini incelemek idi. Bunun için otojen rötreyi etkilerek arttıran hidratasyon, içyapı özellikleriyle beraber  imento içeriğinin etkisi de ele alındı ve değerlendirmelerde sürekli olarak su/ imento oranı SA katkısı ve T , H  koşulları dışında üç tür  imento parametre olarak incelendi. Gerek rötre oluşumuna dolaylı yoldan etkileyen hidratasyon nitelikleri gerek içyapı nitelikleri genellikle C3  imentosunun daha etkin olduğunu kanıtladı. Bu sonuç, otojen rötre-  imento türü kar ıla tırmalarında da kanıtlandı. Buradan   z nen alkali içeriği yüksek olan C3  imentosunun daha büyük otojen rötre olu turabilece i sonucuna varıldı. Ancak,  imentolar kendi aralarında sıralandığında C3  imentosu sadece alkali içeriği yönünden değil diğer yönlerden de yüksek otojen rötre yapmaya yatkın bir  imento olduğu görüldü. Bu diğer etkenler C₃A, C₄AF içerikleri SO₃⁻/  z nen alkali oranı gibi faktörlerdir. Sadece incelik yönünden C3  imentosu rötreyi arttırmayacak yönde idi. Bütün bu faktörler d   n ld  nde kendi aralarında yapılan kar ıla tırmada oransal olarak en büyük etkinliği çözünen alkali miktarı gösterdi. Böylece alkali içeriğinin otojen rötreyi artırma olasılığı daha yüksek olarak değerlendirildi. Ancak bu etkinliğin bir sınırını tespit etmek olanağı elde edilemedi.

Çok yönlü bir konu olan otojen rötre probleminin araştırmaları uzun yıllar devam edecektir. Bu çalışmada ele aldığımız ve özellikle otojen rötrenin fiziko kimyasal bölümüne odakladı ımız çözünen alkali içeriklerinin etkileri bu geniş araştırma

alanında kısıtlı bir yer tutmaktadır. Deney tekniği ve felsefesi açısından izlenecek yol, incelenen faktörün diğerlerinden ayrılarak değiştirilmesi diğerlerinin ise sabit tutulmasıyla mümkündür. Bunu sağlamak için özel olarak imento üretmek gerekir ancak alkaliler için bu durum mevcut teknolojiyle mümkün değildir. Alkali oranları farklı diğer tüm bileşenleri aynı oranda olan çimentoları üretmenin mümkün olduğu durumda bu konuyla ilgili daha somut sonuçlar elde edebilmek mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Aİtcin, P.-C.**, 1998. High-Performance Concrete, E. and F.N. Spon Publ. ISBN 0 4.9 19270 0, London-New York.
- Aİtcin, P.C.**, 1999. Does Concrete Shrink or Does it Swell?, Concrete International, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- Akkaya, Y., Konsta-Gdoutos and M., Shah, S.P.**, 2004. The pore structure and autogenous shrinkage of high-performance concrete with ternary binders, *Proc. of Eight Canmet ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Las Vegas, USA, 233-249
- Akman, M.S.**, 1990. Yapı Malzemeleri, İTÜ Kütüphanesi Sayı 1408, İstanbul.
- Akman, M.S.**, 2000a. Effects of the content and kind of soluble alkalis in cements on different properties of concrete, *Proc. of the 2nd Sympo. of the TCMB Cement and Concrete Technology in 2000's*, İstanbul, Turkey, September 6-10, 103-116
- Akman, M.S.**, 2000b. Yüksek performanslı betonlarda otojen rötre, *Sika Teknik Bülten*, 2000/4, 3-9
- ASTM C186-98**, 1998. Standard test method for heat of hydration of hydraulic cement, *American Society for Testing Materials*.
- Barcelo L, Boivin S., Rigaud S., Acker P., Clavaud B. and Boulay C.**, 1999. Linear vs. Volumetric autogenous shrinkage measurement: material behaviour of experimental artifact, *Self Dessication and Its Importance in Concrete Technology, Proceedings of the Second International Research Seminar*, Lund, June 18, 109-125,
- Barcelo, L.**, 2001. Influence des caractéristiques des ciments sur la structuration et le comportement dimensionnel des matériaux cimentaires au jeune age, *Ecole Normale Supérieure de Cachan*, Cachan, France.
- Barcelo, L., Moranville, M. and Clavaud, B.**, 2005. Autogenous shrinkage of concrete: a balance between autogenous swelling and self-desiccation, *Cement and Concrete Research*, **35**, 177-183.
- Baroghel-Bouny, V., Pierre Mounanga, Khelidj, A., Loukili, A., and Rafai, N.**, 2006. Autogenous deformations of cement pastes part ii. w/c effects, micro-macro correlations, and threshold values, *Cement and Concrete Research*, **36**,1, 123-136.

- Bashir, B.**, 1999. Digital fotogrametrik ortofoto üretimine yönelik bir sym bilgisayar programı ve uygulamaları, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Beltzung, F., and Wittmann, F.**, 2002. Influence of cement composition on endogenous shrinkage, *Proceedings of the Third International Research Seminar in Lund, June 14-15*, 113-126.
- Bentur, A., Igarashi, S.I. and Kovler, K.**, 2001. Prevention of autogenous shrinkage in high strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates, *Cement and Concrete Research*, **31**, 1587-1591.
- Bentz, D.P., Geiker, M.R. and Hansen, K.K.**, 2001. Shrinkage reducing admixtures and early age dessication in cement pastes and mortars, *Cement and Concrete Research*, **31**, 1075-1085.
- Bentz, D.P, Jensen, O.M., Hansen, K.K., Olesen, J.F., Stang, H. and Haecker C.J.**, 2001. Influence of cement particle size distribution on early age autogenous strains and stresses in cement based materials, *Journal of the American Ceramic Society*, **84**, 129-135.
- Bjontegaard, O. and Sellevold, E.J.**, 1998. Thermal dilation-autogenous shrinkage: how to separate, *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, June 13-14, 245-256.
- Boivin, S., Acker, P., Rigaud, S. and Clavaud, B.**, 1998. Experimental assessment of chemical shrinkage of hydrating cement pastes, *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, June 13-14, 81-93
- Bombled, J.P.**, 1980. Influence of sulfates on the rheological behavior of cement paste and their evolution, *Proc. 7th Intern. Cong. Chemistiry of Cement*, Paris, 164-169.
- Brooks, J.J., Cabrera, J.G., Megat Johari, M.A.**, 1998. Factors affecting the autogenous shrinkage of silica fume high strength concrete, *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, June 13-14, 195 - 202.

- Grcia-Boivin, S.**, 2001. Retrait au jeune a ge du be ton—De veloppement d une me thode expe rimentale et contribution a  l analyse physique du retrait endoge ne, *PhD thesis*, Etudes et Recherches des LPC, OA 37 (LCPC Publ., Paris, 2001)
- Hammer, T.A. and Hesse, C.**, 1999. Early age chemical shrinkage and autogenous deformation of cement pastes, *Self Dessication and Its Importance in Concrete Technology, Proceedings of the Second International Research Seminar*, Lund, Sweeden, June 18, 7-13.
- Holt, E.E. and Leivo M.T.**, 1998. Autogenous shrinkage at very early ages, *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, June 13-14, 135-142.
- Holt E.**, 2005. Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages, *Cement and Concrete Research*, **35**, 464-472.
- Hori, A., Morioka, M., Saki, E. and Daimon, M.**, 1998. Influence of expansive additives on autogenous shrinkage, *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, June 13-14., 187-195.
- JCI**, 1998. Technical committee report on autogenous shrinkage of concrete, *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, June 13-14.
- Jawed, I. and Skalny, J.**, 1977a. Alkalies in cement, forms of alkalies and their effects on clinker formation, *Cement and Concrete Research*, **7**, 719-730.
- Jawed, I. and Skalny, J.**, 1977b. Alkalies in Cement : A review i. effects of alkalies on hydration and performance of portland cement, *Cement and Concrete Research*, **7**, 719-729.
- Jensen, O.M. and Hansen, P.F.**, 1995. A Dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening portland cement paste, *Materials and Structures* **28**, (181) 406-409.
- Jensen, O.M. and Hansen P.F.**, 1996. Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume modified cement paste, *ACI Materials Journal*, **93**, No.6, 539-543.
- Jensen, O.M. and Hansen., P.F.**, 1999. Influence of temperature on autogenous deformation and relative humidity change in hardening cement paste, *Cement and Concrete Research*, **29**, 567-575.

- Jensen, O.M. and Hansen, P.F.**, 2001. Autogenous deformation and rh-change in perspective, *Cement and Concrete Research*, **31**, 1859– 1865.
- Joisel, A.**, 1973, Admixtures for Cement Physico-Chemistry of Concrete and Its Reinforcement, Published by the Author, France.
- Justness, H., Van Gemert, A., Verboven, F. and Sellevold, E.**, 1996. Total and external chemical shrinkage of low w/c ratio cement pastes, *Advances in Cement Research*, **8**, No 31, 121-126.
- Justness, H., Hammer, T., Ardouille, B., Hendrix, E., Van Gemert, D. and Overmeer, K.**, 1998a. Chemical shrinkage of cement paste, mortar and concrete, *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, June 13-14, 211-220.
- Justness, H., Sellevold, E.J., Reyiners, B., Van Loo, D., Gemert, A.V., Verboven F. and Van Gemert, D.**, 1998b. The influence of cement characteristics on chemical shrinkage, *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, June 13-14, 71-81.
- Justness, H., Sellevold, E.J., Reyiners, B., Van Loo, M. and Van Gemert, A.**, 1999. Chemical shrinkage of cementitious pastes with mimeral additives, *Self Dessication and Its Importance in Concrete Technology, Proceedings of the Second International Research Seminar*, Lund, Sweeden, June 18, 73-84.
- Justness, H., Clemmens, F., Depuydt, P., Van Gemert, D. and Sellevold, E.J.**, 2000. Correlating the deviation point between external and total chemical shrinkage with the setting time and other characteristics of hydrating cement paste, *Proceedings of the International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete Shrinkage*, V. Baroghel-Bouny, P.C. Aitcin(Eds.), Paris, France, RILEM Publ, Cachan, 57– 73.
- Kantro, D.L.**, 1980. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – miniature slump test, *Cement Concrete and Aggregates*, Vol.2, No.2, 95-102.
- Koenders, E.A.B., Van Breugel, K., de Vries, J., and Soen, H.** 1998. Mix optimization for concrete bridge in view of reduction of risk of cracking at early ages, *Proceedings of the 13th FIP Congress*, Amsterdam, May 1998.

- Kohno, K., Okamoto, T. Isikawa, Y., Sibata, T. and Mori, H.,** 1999. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Research*, **29**, 611-614.
- Le Chatelier, H.,** 1900. Sur les chanements de volume qui accompagnent le durcissement des ciments, *Bull. Socip Société de l'Encouragement pur L'Industrie Nationale*, 5Eme Série, tome5.
- Lee, H.K., Lee, K.M. and Kim, B.G.,** 2003. Autogenous shrinkage of high performance concrete containing fly ash, *Magazine of Concrete Research*, **55**, N0:6, 507-515
- Leivo M. and Holt E.,** 1997. Autogenous volume changes at early ages, *Self Dessication and Its Importance in Concrete Technology, Proceedings of the Second International Research Seminar in Lund*, Lund, Sweeden, June 10, 89-98
- Locher, F. W., Richartz, W. und Sprung, S.** 1976. Erstarren von zement. teil i: reaktion und gefügeentwicklung, *Zement-Kalk-Gips*, **29**, 10, 435-442.
- Loukili, A., Khelidj, A. And Richard, P.,** 1999. Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra high strength concrete, *Cement and Concrete Research*, **29**, 577-584.
- Loukili, A., Chopin, D., Khelidj, A. and Touzo, L.,** 2000. A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history, *Cement and Concrete Research*, **30**, 915-922.
- Luke, K., Aïtcin, P.C.,** 1991. Effect of superplasticizer on ettringite formation in ceramic transactions, *Advances in Cementitious Materials* (ed. S. Mindess) Vol. **16**, 147-166.
- Lura, P., Breugel, K. And Maruyama, I.,** 2001. Effects of curing temperature and type of cement on early age shrinkage of high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, **31**, 1867–1872.
- Mehta, P.K.,** 1986. Concrete, Prentice Hall, NJ.
- Mihashi, H. and Leite, J.P.B.,** 2004. State of the art report on control of cracking in early age concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.**2**, No. 2., 141-154.
- Miyazawa, S. and Monterio, P.J.M.,** 1996. Volume change of high strength concrete in moist conditions, *Cement and Concrete Research*, **26**, 567-572.

- Miyazawa, S., Kuroi, T. and Tazawa E.,** 2001. Influence of chemical composition and particle size of cement on autogenous shrinkage, *JSCE Second International Conference on Engineering Materials*, Aug 2001, Japan.
- Nawa, T. and Horita T.,** 2004. Autogenous shrinkage of high-performance concrete, *Proc. of the Int. Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures*, Sapparo, Japan, February 10.
- Niël, E.M.M.G.,** 1968. The Influence of alkali carbonate on the hydration of cement, *5th International Symposium on Chemistry of Cement*, Tokyo, 472-491.
- Onfrei, M., and Gray, M.,** 1989. Adsorption studies of 35s-labelled superplasticizer in cement-based grout, *ACI SP-119*, 645-660.
- Ono, M., Nagashima, M. and Saito, M.,** 1980. The stiffening of mortar accompanied with the early hydration of cement, *Proc. 7th Intern. Cong. Chemistry of Cement*, V2, Paris, 172-175.
- Paillère, A.M., Buil, M. and Serrano, J.J.,** 1989. Effect of fiber addition on the autogenous shrinkage of silica fume concrete, *ACI Materials Journal*, V86, No.2, 139-144.
- Park K.B., Noguchi T. and Tomosawa F.,** 1998. A study on the hydration ratio and autogenous shrinkage of cement paste, *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, June 13-14, 299-308.
- Pekmezci, B.Y. ve Akman, M.S.,** 2003. Yüksek performanslı betonların otojen rötresine çimento alkali içeriği ve süperakışkanlaştırıcı türünün etkileri, *Sika Teknik Bülten*, 2003/1, 3-9.
- Persson, B.S.M,** 1998. Shrinkage of high performance concrete”, *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, June 13-14, 105-116.
- Postacioğlu, B.,** 1986. Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, Cilt 1 Bağlayıcı Maddeler, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- Postacioğlu, B.,** 1986. Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, Cilt 2 Agregalar, Beton, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- Powers, T., C., and Brownyard, T., L.,** 1946. Studies of the physical properties of hardened portland cement paste, part 2 with appendix (studies of water fixation), *Journal of ACI.*, Vol 43, 249-336.

- Powers, T.C.**, 1964, The physical structure in portland cement paste, *The Chemistry of Cements*, T.C.Powers (Ed.), Academic Press, London and New York, **1**, 391-416
- Radocea, A.**, 1998. Autogenous volume change of concrete at very early age, *Magazine of Concrete Research*, **50**, No.2, 107-113.
- Ramachandran V.S. and Beaudin J.J.**, 2000. Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology, Principles Techniques, and Applications, Noyes Publications, NJ, USA.
- Reinhardt, H.W., and Grosse C.U.**, 1996. *NDTnet* , Vol.1, No.07.
- Remondino, F.**, 2002.3-D Reconstruction Of Articulated Objects From Uncalibrated Images, Three-Dimensional Image Capture and Application V, *SPIE Electronic Imaging, Proc. of SPIE 4661*, San Jose, USA
- Sakata, K., and Shimomura, T.**, 2004. Recent progress in research on and cde evaluation of concrete creep and shrinkage in japan, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.2, No. 2., 133-140.
- Shah, S.P. and Weiss, J.**, 2000. The relationship between strength permeability and strength relationship, *Proc. of PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete Orlando*, Florida, USA, September 23.
- Spierings, G.A.C.M. and Stein, H.N.**, 1976. The influence of Na_2O on the hydration of C_3A ; i. paste hydration, *Cement and Concrete Research*, **6**, 265-272.
- Taylor, H.W.F.**, 1964. The Chemistry of Cements, Academic Press, London and New York.
- Tazawa E. and Miyazawa S.**, 1995a. Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Research*, **25**, 1633-1638.
- Tazawa E., Miyazawa S. and Kasai T.**, 1995b. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste, *Cement and Concrete Research*, **25**, 288-292.
- Tazawa, E. and Miyazawa, S.**, 1995c. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste, *Cement and Concrete Research*, **25**, 281-287.

- Tazawa, E. and Miyazawa, S.**, 1997. Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials, *Magazine of Concrete Research*, **49**, 15-22.
- Tazawa, E. and Miyazawa, S.**, 1998. Effect of constituents and curing condition on autogenous shrinkage of concrete, *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, June 13-14, 269-280.
- TS 687**, 1985. Çimentonun kimyevi analiz metodları, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 3530 EN 933-1**, 1999. Agravaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1, tane büyüklüğü dağılımı tayini-eleme metodu, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TSEN 196-3**, 2002. Çimento deney metodları- bölüm 3: priz süresi ve hacim genişleme tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TSEN 197-1**, 2002. Çimento- bölüm 1: genel çimentolar- bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TSEN 197-2**, 2002. Çimento- bölüm 2: uygunluk değerlendirmesi, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 1907-6**, 2002. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler, bölüm 6: tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- Turcry, P., Loukili, A., Barcelo, L. and Casabonne, J.M.**, 2002. Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age?, *Cement and Concrete Research*, **32**, 1443-1450.
- Turcry, P. and Loukili, A.**, 2002. Autogenous and thermal deformations of low water/cement ratio cement paste at early age, *15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Columbia Univ, New York, NY, June 2-5.
- Vernet, C.**, 1995. Mécanismes chimiques d'interactions ciment-adjuvants, *CTG Spa.Guerville Service Physico-Chimie du Ciment*, Janvier,10.
- Weiss J.**, 2002. Treating your concrete right at early ages., *ACPA 2002 Indiana Concrete Pavement Conference*, Indiana, USA, November 11,12.

- Wild, S., Khatib, J., M. and Roose L.J.**, 1998. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of portland cement metakaolin pastes, *Advances in Cement Research*, **10**, No.3, 109-119.
- Woermann, Th. and Hahn, Eysel W.**, 1979. The substitution of alkalies in tricalcium silicate, *Cement and Concrete Research*, **9**, (6), 701-711.
- Xi, Y., Shing, B., Abu-Hejleh, N., Asiz, A., Suwito, A., Xie, Z., and Abaneh A.**, 2003. Assessment of the cracking problem in newly constructed bridge decks in colorado cdot-dtd-r-2003-3, Final Report, *The Colorado Department of Transportation Research Branc*, Colorado,USA.
- Yang, Q. and Zhang, S.**, 2004. Self dessication mechanism of high performance concrete, *Journal of Zhejiang University Science*, **5**, 12, 1517-1523.
- Yıldırım, H., Akman, S. ve Pekmezci B.Y.**, 2003. Çimentonun çözünen alkali içeriğinin yüksek performanslı beton niteliklerine etkisi, *Tübitak INTAG 649*, 2003.

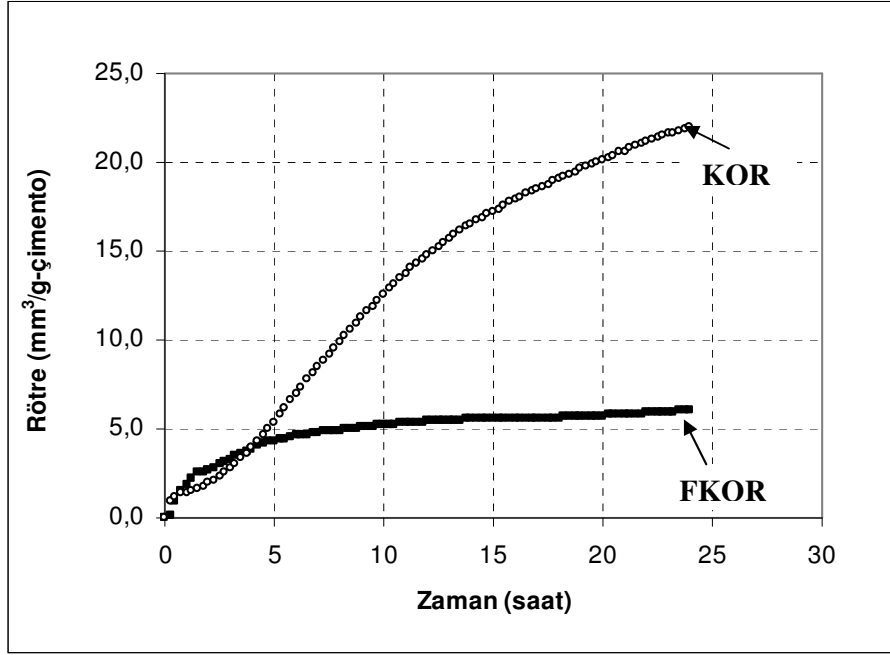
EK A

Tablo A.1: Tam izole (Tİ) ortamda saklanan hamur numunelerde ölçülen rötire sonuçları (mm³/g-çimento)

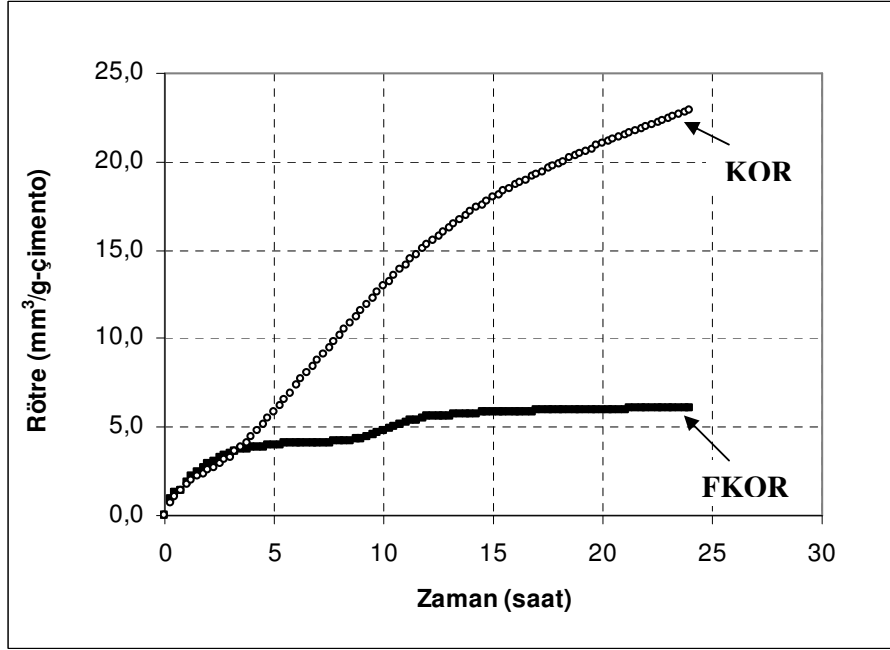
Numune kodu	C1HM	C2HM	C3HM	C1SAHM	C2SAHM	C3SAHM
Zaman (saat)						
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	2,706	2,870	1,869	2,731	2,877	1,945
4	3,823	3,817	3,200	3,601	3,647	2,903
6	4,640	4,052	4,888	4,933	4,497	3,537
8	4,919	4,164	5,919	6,213	6,089	4,910
10	5,195	4,749	6,449	6,708	6,946	6,530
12	5,427	5,550	7,059	6,778	7,282	7,109
14	5,538	5,748	7,204	6,713	7,339	7,250
16	5,576	5,860	7,317	6,649	7,304	7,174
18	5,624	5,934	7,454	6,649	7,257	7,131
20	5,753	5,977	7,572	6,665	7,218	7,141
22	5,907	6,047	7,747	6,695	7,232	7,189
24	6,019	6,128	7,893	6,729	7,228	7,253

Tablo A.2: Tablo 4.19. Hİ koşulunda ölçülen kimyasal otojen rötire deneyi sonuçları (mm³/g-çimento)

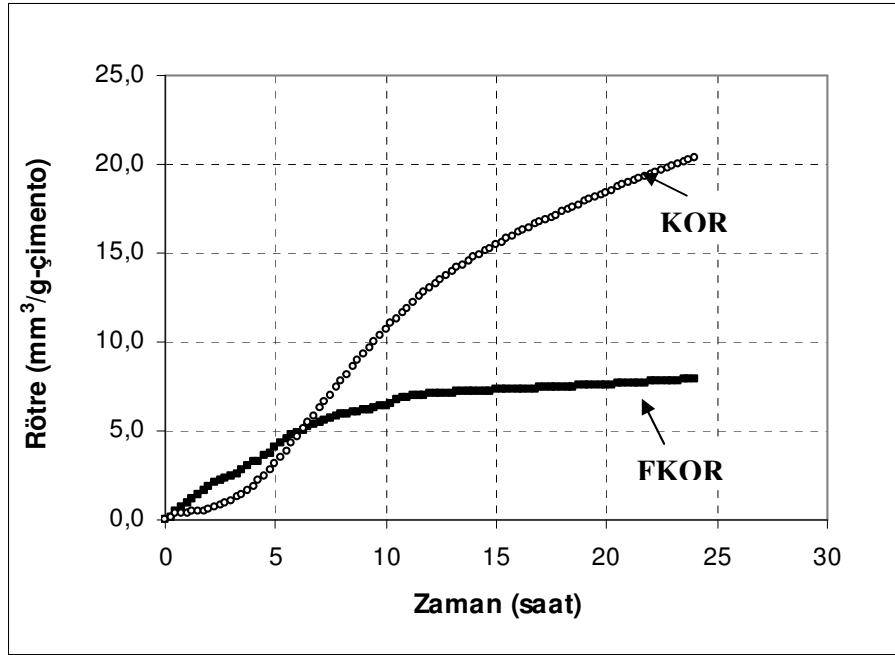
	Toplam Kimyasal Rötire (%)					
Numune kodu	C1HM	C2HM	C3HM	C1SAHM	C2SAHM	C3SAHM
Zaman (saat)						
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	1,932	2,536	0,570	0,946	1,306	0,070
4	3,943	4,139	1,901	1,324	1,528	0,467
6	6,964	6,925	4,663	1,943	2,014	1,255
8	9,920	9,861	7,815	3,345	2,664	3,479
10	12,539	12,613	10,663	5,643	4,175	7,033
12	14,798	15,061	13,009	8,104	6,733	10,479
14	16,527	16,939	14,716	10,345	9,583	13,196
16	17,899	18,469	16,110	12,045	12,672	15,093
18	19,045	19,752	17,281	13,241	14,842	16,325
20	20,125	20,856	18,409	14,101	16,419	17,238
22	21,116	21,813	19,409	14,902	17,539	18,016
24	21,976	22,747	20,304	15,586	18,511	18,703



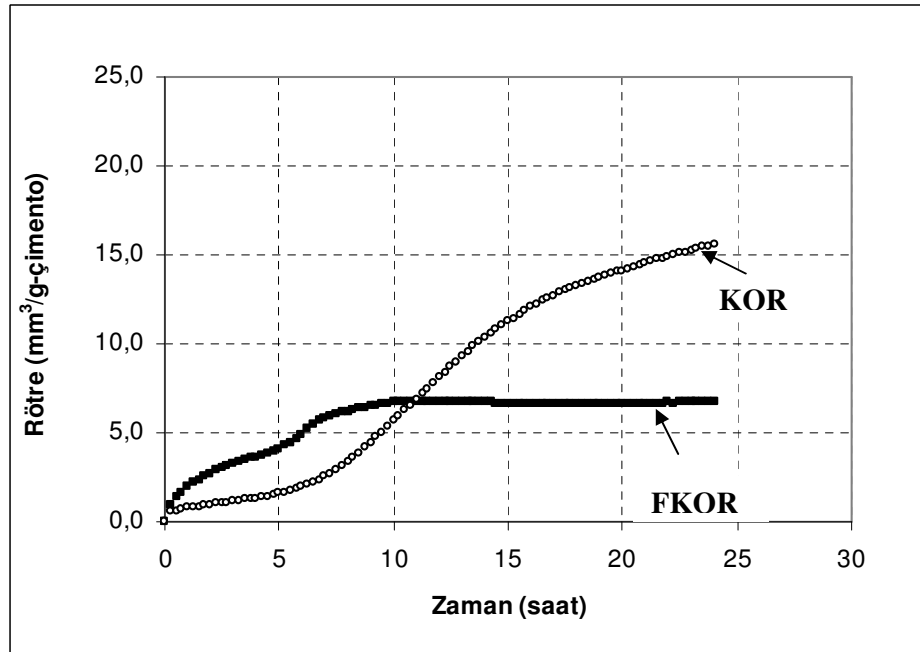
Şekil A.1: SA içermeyen C1 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi



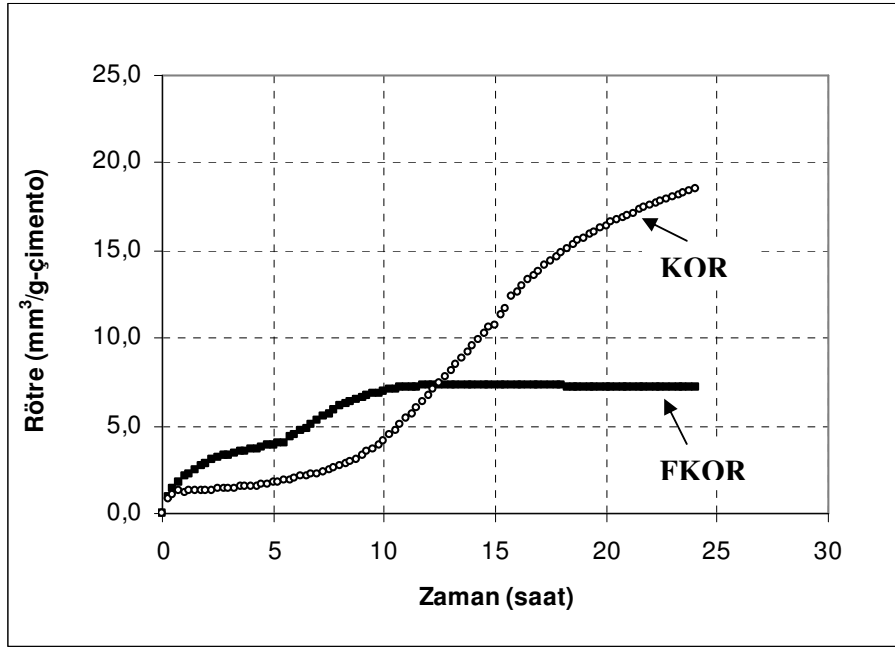
Şekil A.2: SA içermeyen C2 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi



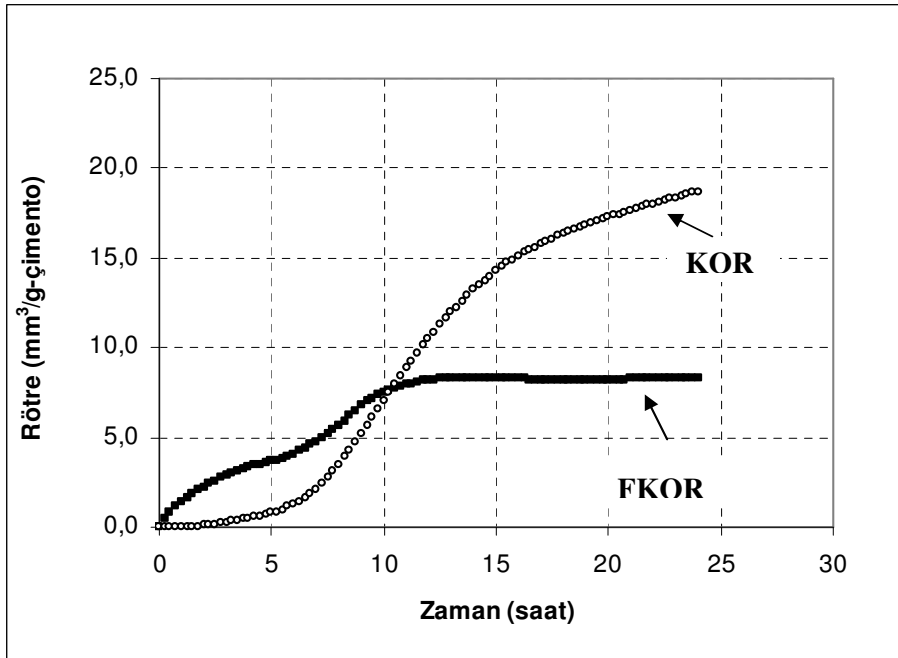
Şekil A.3: SA içermeyen C3 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi



Şekil A.4: SA içeren C1 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi

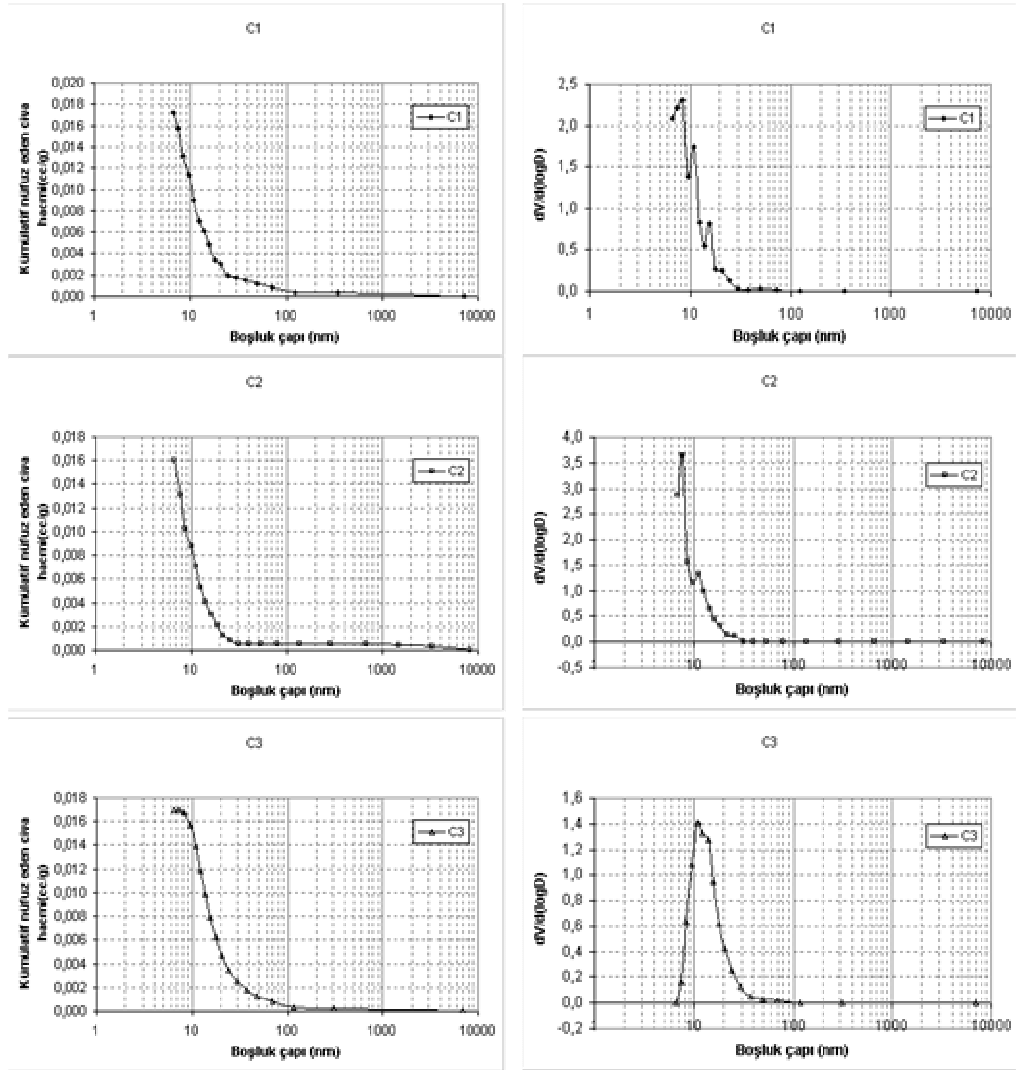


Şekil A.5: SA içeren C2 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi



Şekil A.6: SA içeren C3 çimentosu KOR ve FKOR gelişimi

EK B



Şekil B.1: S/Ç=0,20 olan SA içeren çimento hamurlarının Tİ koşulunda 24 saat sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, dV/d(logD)-boşluk çapı grafikleri

Tablo B.1: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içeren C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

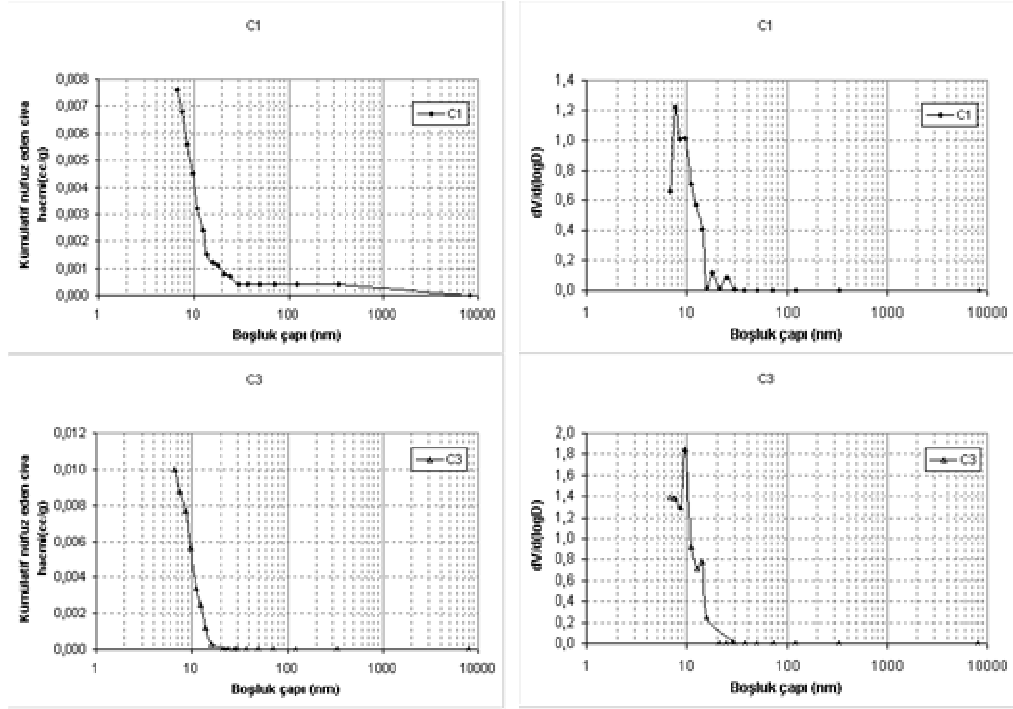
Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	7128,00	0,00000	0,00
4,2	346,20	0,00030	0,00
11,8	124,60	0,00030	0,00
20,3	72,55	0,00080	0,02
29,2	50,29	0,00120	0,02
38,7	38,03	0,00150	0,02
49,3	29,86	0,00170	0,04
60,1	24,45	0,00200	0,14
71,0	20,73	0,00300	0,26
82,1	17,91	0,00340	0,27
93,8	15,69	0,00490	0,82
105,8	13,90	0,00610	0,55
118,6	12,40	0,00700	0,83
134,2	10,96	0,00900	1,74
153,5	9,58	0,01130	1,39
174,8	8,41	0,01320	2,31
197,3	7,45	0,01570	2,22
220,9	6,66	0,01720	2,08

Tablo B.2: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içeren C2 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	8178,00	0,00000	0,00
0,4	3330,00	0,00030	0,00
1,0	1468,00	0,00040	0,00
2,2	665,50	0,00050	0,00
5,1	287,60	0,00050	0,00
10,8	136,20	0,00050	0,00
18,4	79,76	0,00050	0,00
27,1	54,21	0,00050	0,00
36,5	40,33	0,00050	0,00
46,5	31,60	0,00050	0,01
57,3	25,68	0,00080	0,12
68,1	21,59	0,00130	0,15
79,4	18,52	0,00210	0,32
91,1	16,14	0,00300	0,45
103,3	14,23	0,00410	0,67
116,0	12,68	0,00530	0,98
130,2	11,30	0,00710	1,34
148,5	9,90	0,00870	1,15
170,0	8,65	0,01020	1,57
192,6	7,64	0,01310	3,64
216,4	6,80	0,01600	2,88

Tablo B.3: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içeren C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	7000,00	0,00000	0,00
4,8	308,80	0,00020	0,00
12,4	118,30	0,00030	0,00
20,9	70,20	0,00080	0,02
30,0	49,02	0,00130	0,03
39,4	37,28	0,00180	0,05
49,7	29,58	0,00250	0,13
60,5	24,30	0,00340	0,25
71,3	20,62	0,00470	0,43
82,5	17,82	0,00620	0,62
94,2	15,62	0,00790	0,94
106,3	13,84	0,00990	1,28
119,0	12,36	0,01190	1,32
135,2	10,88	0,01390	1,41
155,4	9,46	0,01570	1,08
177,0	8,31	0,01670	0,64
199,7	7,36	0,01700	0,16
223,5	6,58	0,01700	0,00



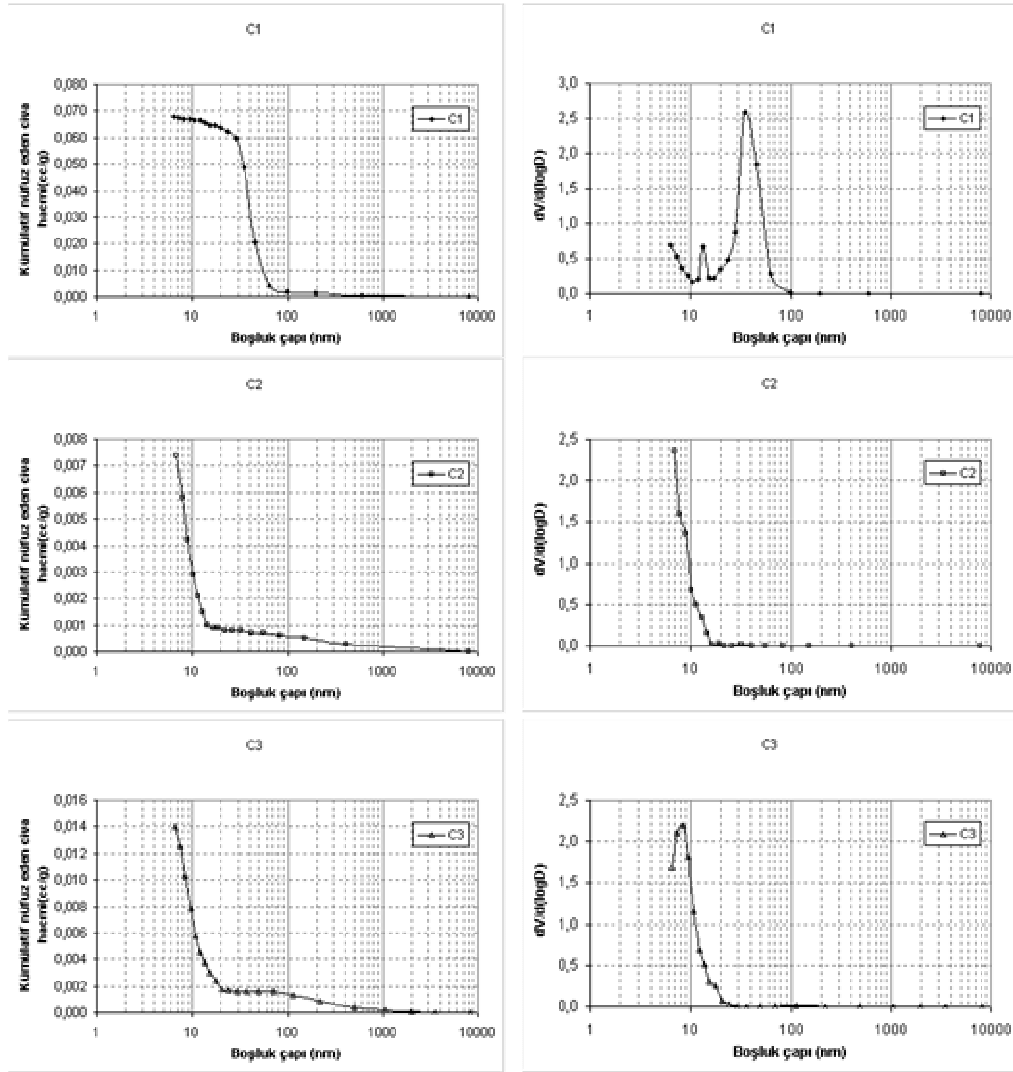
Şekil B.2: $S/\zeta=0,20$ olan SA içeren çimento hamurlarının Hİ koşulunda 24 saat sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, $dV/d(\log D)$ -boşluk çapı grafikleri

Tablo B.4: Havadan izole (Hİ) koşullarda su içinde 24 saat saklanmış SA içeren C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	8178,00	0,00000	0,00
4,4	331,60	0,00040	0,00
11,9	123,10	0,00040	0,00
20,4	72,14	0,00040	0,00
29,4	50,02	0,00040	0,00
39,0	37,73	0,00040	0,00
49,1	29,98	0,00040	0,01
59,7	24,62	0,00070	0,09
70,4	20,88	0,00080	0,02
81,6	18,03	0,00110	0,12
93,1	15,79	0,00120	0,02
105,2	13,98	0,00150	0,41
117,9	12,48	0,00240	0,57
133,2	11,04	0,00320	0,71
152,4	9,65	0,00450	1,01
173,7	8,47	0,00560	1,00
196,0	7,50	0,00680	1,22
218,6	6,73	0,00760	0,66

Tablo B.5: Havadan izole (Hİ) koşullarda su içinde 24 saat saklanmış SA içeren C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	8009,00	0,00000	0,00
4,4	336,20	0,00000	0,00
11,9	124,00	0,00000	0,00
20,3	72,48	0,00000	0,00
29,2	50,29	0,00000	0,00
38,6	38,08	0,00000	0,00
48,5	30,33	0,00000	0,00
59,0	24,93	0,00000	0,00
69,7	21,10	0,00000	0,00
80,8	28,21	0,00000	0,02
92,3	15,93	0,00030	0,25
104,3	14,10	0,00120	0,78
116,8	12,59	0,00250	0,71
131,4	11,20	0,00340	0,92
150,4	9,78	0,00560	1,85
171,5	8,57	0,00770	1,29
193,9	7,59	0,00880	1,39
217,4	6,77	0,01000	1,39



Şekil B.3: S/Ç=0,20 olan SA içeren çimento hamurlarının Tİ koşulunda 28 gün sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, dV/d(logD)-boşluk çapı grafikleri

Tablo B.6: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içeren C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

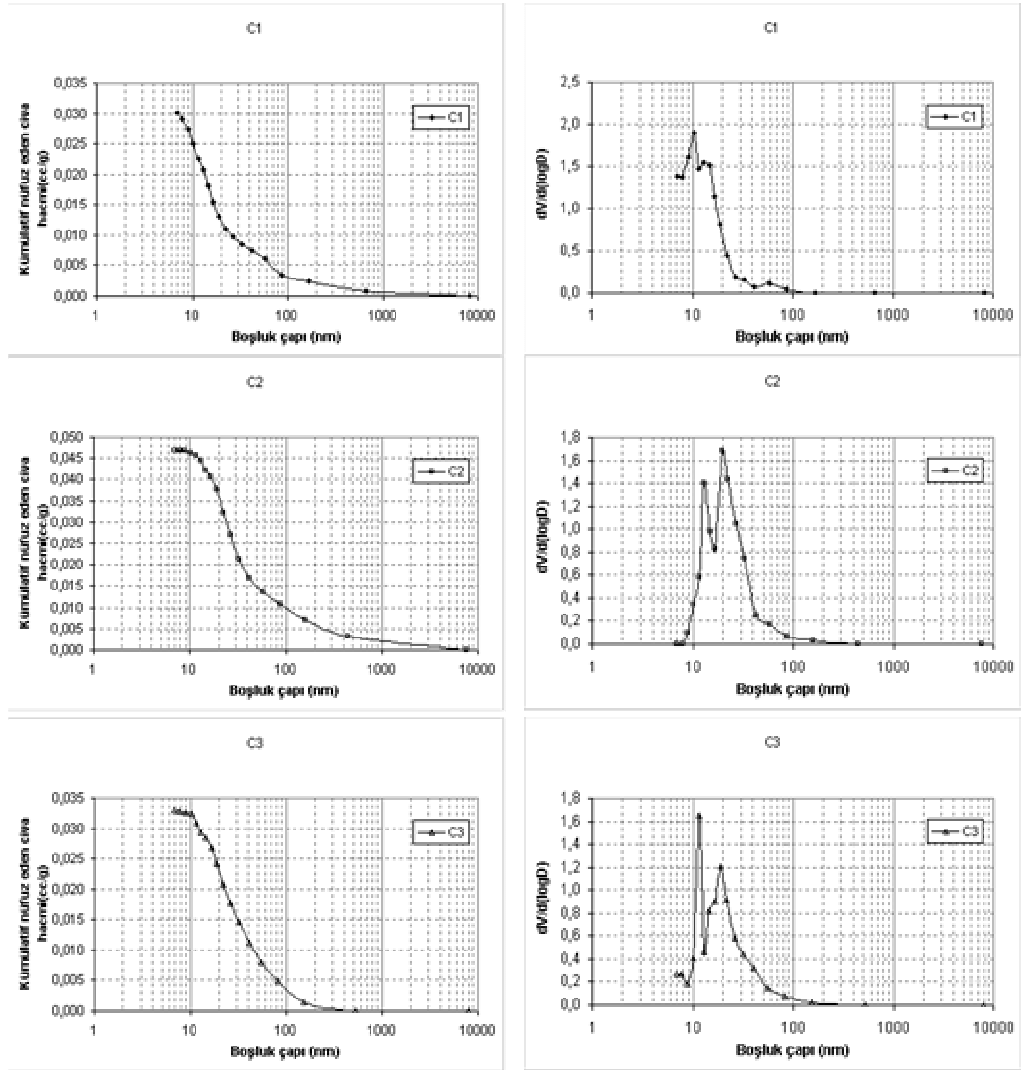
Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	8009,00	0,00000	0,00
2,5	600,20	0,00070	0,00
7,5	195,20	0,00120	0,00
14,8	99,05	0,00180	0,02
23,2	63,35	0,00420	0,27
32,0	45,91	0,02070	1,85
41,7	35,31	0,04880	2,58
51,7	28,44	0,05970	0,88
62,5	23,54	0,06230	0,48
73,3	20,05	0,06360	0,35
84,7	17,37	0,06440	0,22
96,5	15,24	0,06460	0,23
108,8	13,52	0,06570	0,67
121,8	12,08	0,06620	0,20
137,9	10,60	0,06650	0,18
157,9	9,31	0,06680	0,25
179,7	8,18	0,06710	0,36
202,7	7,26	0,06750	0,53
226,6	6,49	0,06800	0,69

Tablo B.7: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içeren C2 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	7848,00	0,00000	0,00
3,6	410,90	0,00030	0,00
9,7	151,40	0,00050	0,00
17,5	83,98	0,00060	0,00
26,1	56,29	0,00070	0,00
35,3	41,64	0,00070	0,01
45,3	32,46	0,00080	0,01
56,2	26,15	0,00080	0,00
66,9	22,00	0,00080	0,01
77,9	18,88	0,00090	0,04
89,4	16,46	0,00090	0,01
101,3	14,52	0,00100	0,14
113,7	12,93	0,00150	0,35
127,5	11,53	0,00210	0,50
145,8	10,09	0,00290	0,68
166,7	8,82	0,00420	1,35
188,9	7,79	0,00580	1,60
212,1	6,93	0,00740	2,37

Tablo B.8: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içeren C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	8354,00	0,00000	0,00
0,4	3557,00	0,00000	0,00
0,7	1977,00	0,00010	0,00
1,4	1054,00	0,00020	0,00
2,9	498,80	0,00040	0,00
6,6	222,80	0,00080	0,00
13,0	113,10	0,00130	0,01
21,0	70,88	0,00160	0,00
29,9	49,23	0,00160	0,00
39,4	37,32	0,00160	0,00
49,8	29,52	0,00160	0,00
60,6	24,26	0,00170	0,03
71,6	20,53	0,00180	0,07
83,1	17,71	0,00240	0,26
95,0	15,48	0,00300	0,30
107,5	13,69	0,00370	0,52
120,4	12,21	0,00460	0,69
135,3	10,87	0,00580	1,17
154,4	9,53	0,00790	1,82
176,3	8,34	0,01030	2,20
199,5	7,37	0,01250	2,11
223,7	6,58	0,01400	1,68



Şekil B.4: S/Ç=0,25 olan SA içermeyen çimento hamurlarının Tİ koşulunda 24 saat sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, dV/d(logD)-boşluk çapı grafikleri

Tablo B.9: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içermeyen C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

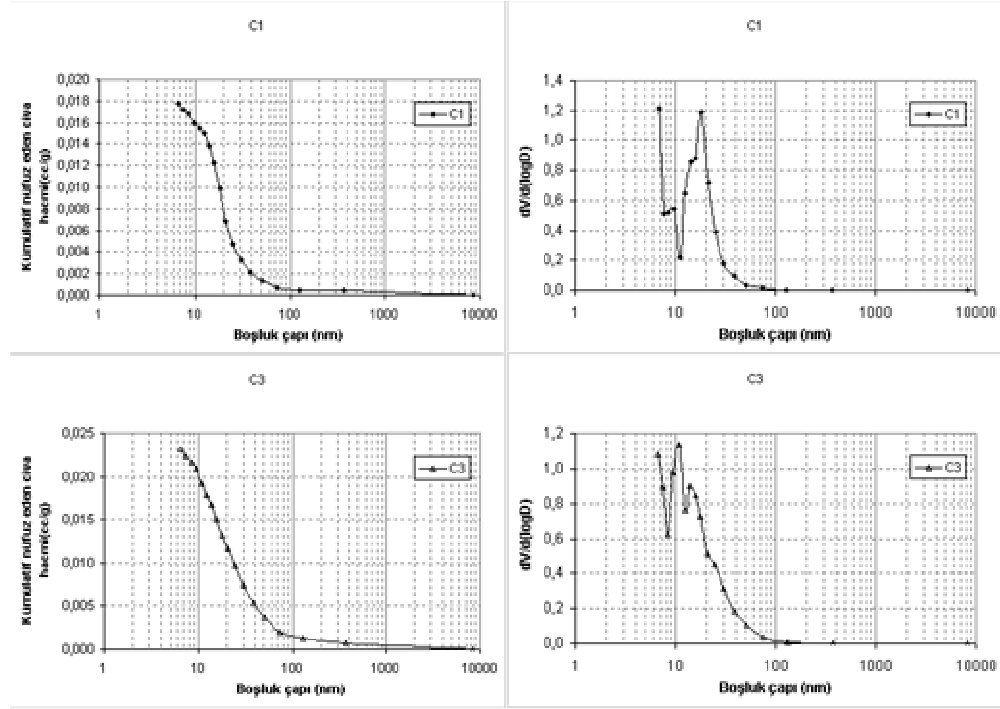
Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	8178,00	0,00000	0,00
2,2	654,90	0,00080	0,00
8,7	169,50	0,00250	0,01
16,8	87,50	0,00340	0,04
25,5	57,59	0,00620	0,12
34,8	42,25	0,00760	0,08
44,8	32,83	0,00860	0,16
55,1	26,68	0,00980	0,19
65,9	22,31	0,01090	0,44
76,9	19,14	0,01300	0,81
88,2	16,67	0,01540	1,15
100,1	14,69	0,01810	1,51
112,4	13,08	0,02070	1,55
125,8	11,69	0,02260	1,47
143,0	10,28	0,02510	1,91
163,8	8,98	0,02750	1,61
185,9	7,91	0,02900	1,37
209,0	7,04	0,03020	1,39

Tablo B.10: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içermeyen C2 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	7543,00	0,00000	0,00
3,3	444,00	0,00330	0,01
9,3	158,80	0,00710	0,03
16,9	86,81	0,01070	0,07
25,5	57,61	0,01370	0,17
34,7	42,39	0,01690	0,25
44,5	33,08	0,02130	0,75
54,8	26,83	0,02710	1,05
65,4	22,49	0,03220	1,44
76,4	19,25	0,03770	1,68
87,9	16,74	0,04070	0,83
99,8	14,74	0,04220	0,98
112,2	13,11	0,04440	1,40
194,7	11,69	0,04570	0,58
144,0	10,22	0,04630	0,35
165,0	8,91	0,04670	0,10
187,3	7,85	0,04670	0,00
210,6	6,98	0,04670	0,00

Tablo B.11: Tam izole (Tİ) koşullarda 24 saat saklanmış SA içermeyen C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	8009,00	0,00000	0,00
2,8	531,90	0,00000	0,00
9,6	153,00	0,00150	0,02
17,9	82,28	0,00480	0,08
26,7	55,10	0,00800	0,16
36,0	40,88	0,01110	0,32
45,7	32,16	0,01470	0,44
56,1	26,21	0,01770	0,59
66,9	21,98	0,02070	0,92
77,9	18,87	0,02430	1,21
89,4	16,45	0,02680	0,90
101,4	14,51	0,02840	0,81
113,8	12,92	0,02940	0,46
127,5	11,54	0,03090	1,65
145,0	10,15	0,03240	0,41
166,0	8,86	0,03250	0,18
188,3	7,81	0,03280	0,27
211,6	6,95	0,03300	0,27



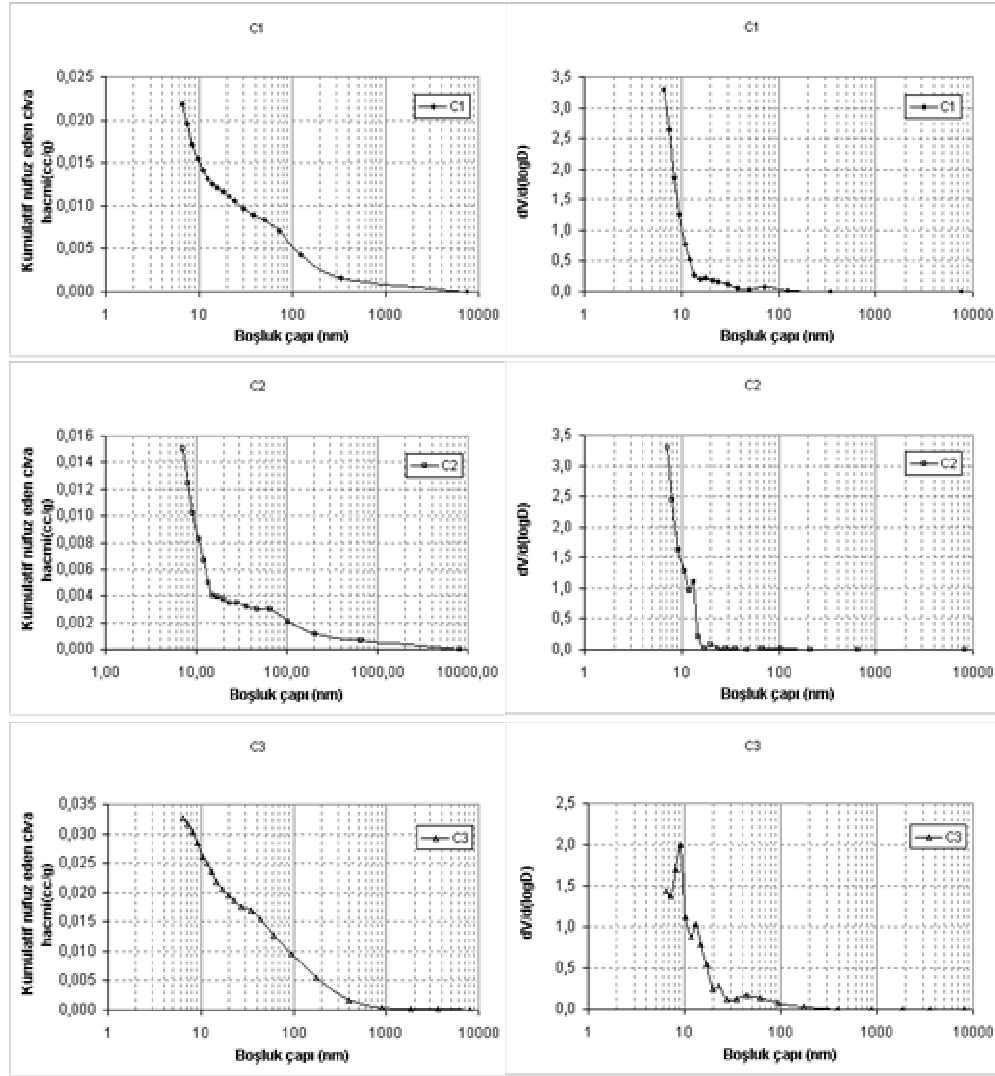
Şekil B.5: $S/\zeta=0,25$ olan SA içermeyen çimento hamurlarının Hİ koşulunda 24 saat sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, $dV/d(\log D)$ -boşluk çapı grafikleri

Tablo B.12: Havadan izole (Hİ) koşullarda su içinde 24 saat saklanmış SA içermeyen C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	8354,00	0,00000	0,00
4,0	367,00	0,00040	0,00
11,4	128,80	0,00040	0,00
19,9	74,06	0,00070	0,02
28,8	51,12	0,00130	0,03
38,2	38,55	0,00210	0,10
48,0	30,64	0,00330	0,18
58,9	24,98	0,00470	0,39
69,7	21,11	0,00680	0,72
80,7	18,22	0,00990	1,19
92,2	15,94	0,01230	0,89
104,2	14,11	0,01380	0,85
117,0	12,57	0,01510	0,65
132,1	11,13	0,01550	0,22
150,3	9,78	0,01600	0,54
171,6	8,57	0,01680	0,52
194,0	7,58	0,01720	0,51
217,4	6,76	0,01770	1,21

Tablo B.13: Havadan izole (Hİ) koşullarda su içinde 24 saat saklanmış SA içermeyen C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	8354,00	0,00000	0,00
3,9	372,40	0,00070	0,00
11,3	130,20	0,00120	0,01
19,7	73,62	0,00190	0,04
28,6	51,39	0,00370	0,10
37,9	38,76	0,00540	0,18
48,6	30,23	0,00750	0,31
60,3	24,37	0,00970	0,45
71,3	20,63	0,01160	0,51
82,5	17,83	0,01320	0,73
94,1	15,64	0,01500	0,84
106,2	13,85	0,01670	0,91
119,1	12,34	0,01780	0,76
134,7	10,92	0,01920	1,14
154,5	9,52	0,02090	0,97
176,1	8,36	0,02160	0,62
198,6	7,41	0,02230	0,90
222,2	6,62	0,02320	1,08



Şekil B.6: S/Ç=0,25 olan SA içermeyen çimento hamurlarının Tİ koşulunda 28 gün sonundaki kümülatif hacim-boşluk çapı, dV/d(logD)-boşluk çapı grafikleri

Tablo B.14: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içermeyen C1 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	7543,00	0,00000	3,13
4,4	338,10	0,00160	5,12
11,9	123,50	0,00440	2,84
20,4	72,19	0,00710	7,42
29,3	50,11	0,00840	4,74
38,8	37,89	0,00900	6,36
49,1	29,96	0,00970	1,14
60,3	24,41	0,01050	1,63
71,1	20,68	0,01110	1,79
82,3	17,87	0,01170	2,14
94,0	15,65	0,01220	1,97
106,1	13,87	0,01260	2,62
118,7	12,39	0,01310	5,28
133,5	11,02	0,01410	7,70
152,4	9,65	0,01540	1,26
173,8	8,47	0,01720	1,85
196,2	7,50	0,01950	2,65
219,8	6,69	0,02180	3,29

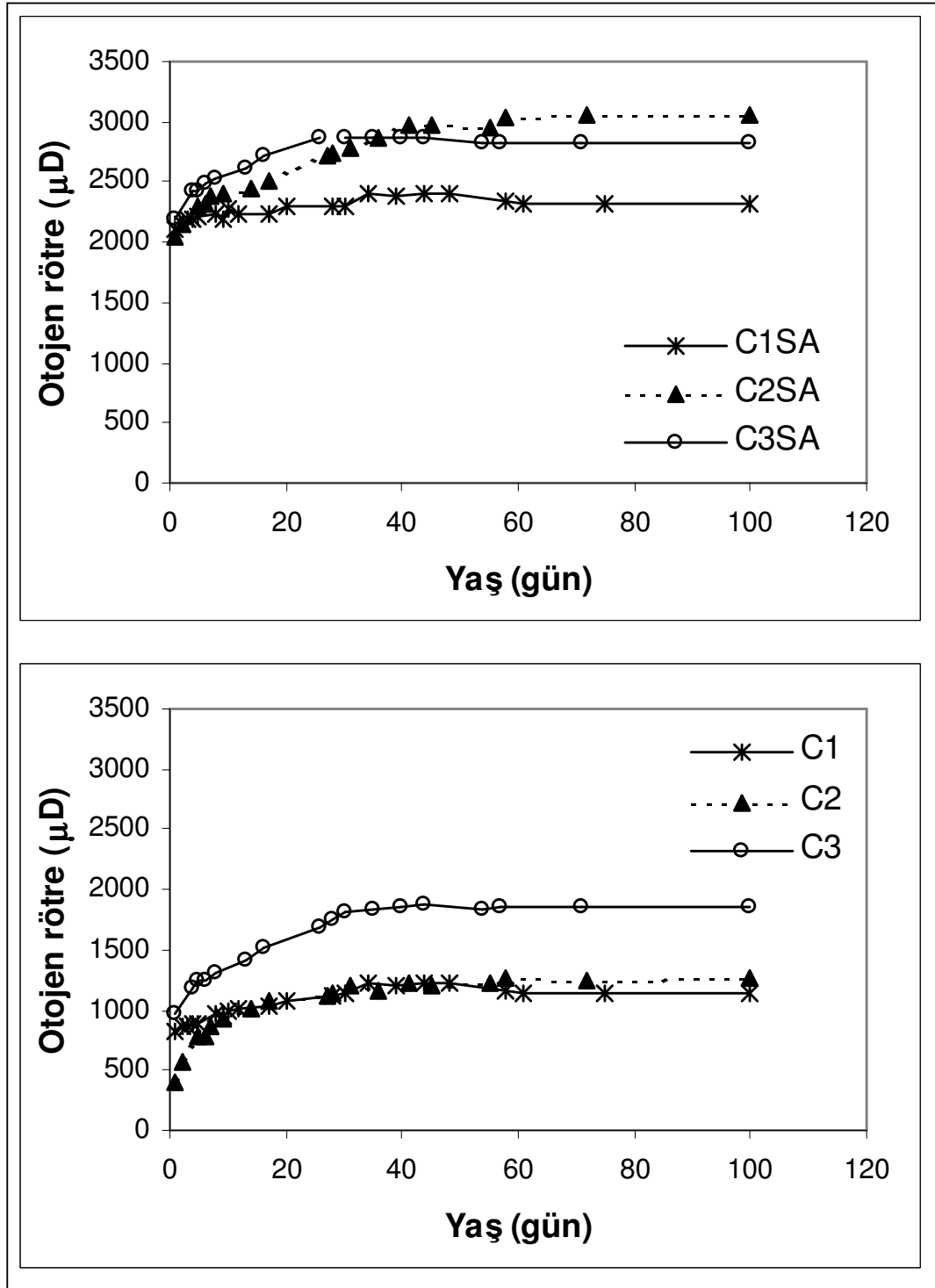
Tablo B.15: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içermeyen C2 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	8178,00	0,00000	0,00
2,3	645,40	0,00070	0,00
7,0	210,00	0,00110	0,00
14,1	104,40	0,00210	0,02
22,3	65,85	0,00300	0,01
31,3	47,01	0,00300	0,01
40,9	35,95	0,00320	0,02
52,0	28,30	0,00350	0,02
63,3	23,23	0,00350	0,03
74,2	19,82	0,00370	0,08
85,6	17,19	0,00390	0,03
97,4	15,10	0,00400	0,19
109,7	13,40	0,00500	1,09
123,0	11,96	0,00660	0,96
139,8	10,52	0,00820	1,29
160,2	9,18	0,01020	1,63
182,1	8,08	0,01240	2,45
205,1	7,17	0,01510	3,30

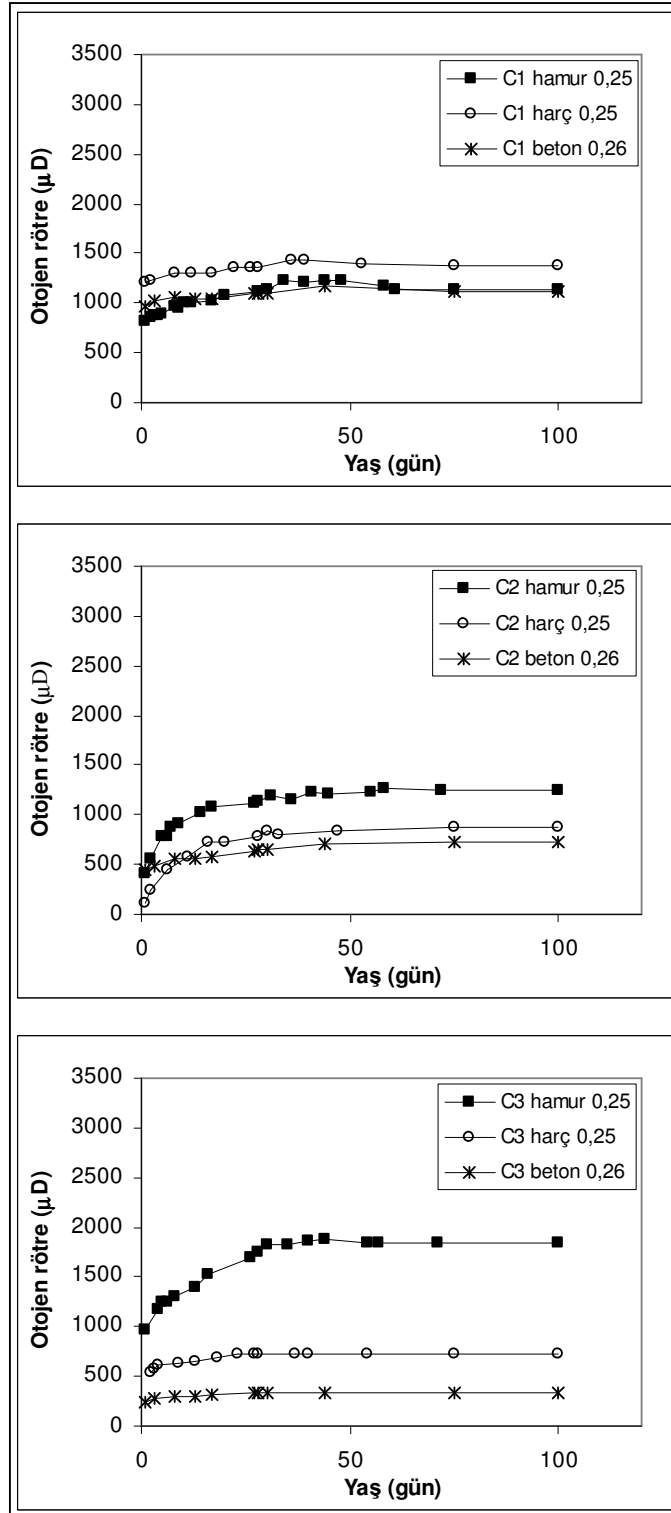
Tablo B.16: Tam izole (Tİ) koşullarda 28 gün saklanmış SA içermeyen C3 çimento hamurunda civalı porozimetre deneyi sonuçları.

Uygulanan Basınç (N/mm ²)	Boşluk çapı (nm)	Civa hacmi (cc/g)	dV/d(logD)
0,2	8178,00	0,00000	0,00
0,4	3639,00	0,00030	0,00
0,8	1861,00	0,00030	0,00
1,6	901,40	0,00040	0,00
3,7	395,40	0,00170	0,01
8,4	175,70	0,00550	0,03
15,4	95,53	0,00950	0,07
23,7	61,99	0,01280	0,13
32,8	44,82	0,01550	0,17
42,5	34,64	0,01690	0,12
52,9	27,82	0,01760	0,11
63,6	23,10	0,01860	0,29
74,8	19,67	0,01950	0,25
86,3	17,04	0,02050	0,55
98,3	14,95	0,02190	0,79
110,9	13,27	0,02350	1,03
124,5	11,82	0,02500	0,88
141,0	10,43	0,02610	1,13
161,4	9,11	0,02850	2,00
181,9	8,09	0,03030	1,70
203,3	7,23	0,03170	1,38
227,1	6,48	0,03260	1,44

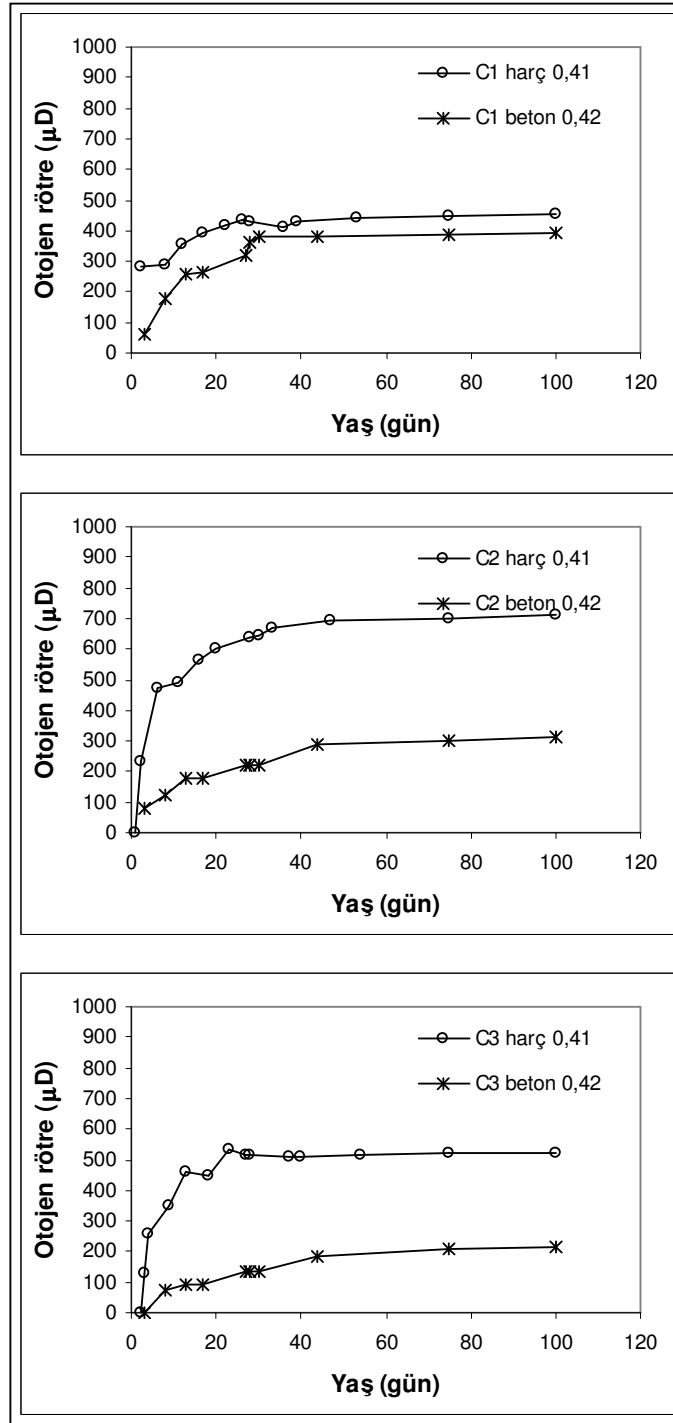
EK C



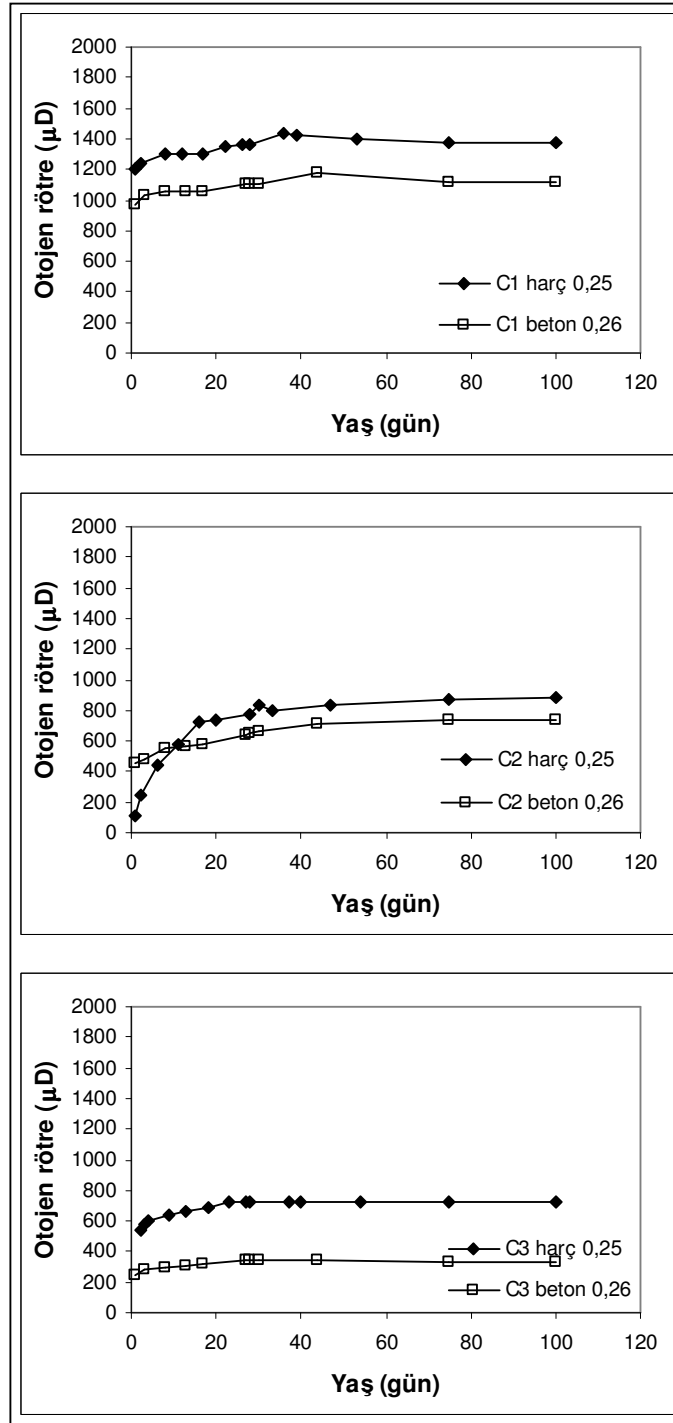
Şekil C.1: Tİ Koşullarında saklanan çimento hamurlarının uzun süreli lineer otojen rötre değerleri



Şekil C.2: Tİ koşulunda saklanan ve S/Ç oranları 0,25-0,26 olan hamur, harç ve betonların uzun süreli lineer otojen rötrelerinin karşılaştırılması.



Şekil C.3: Tİ koşulunda saklanan ve S/Ç oranları 0,41-0,42 olan harç ve betonların uzun süreli lineer otojen rötrelerinin karşılaştırılması.



Şekil C.4: Tİ koşulunda saklanan ve S/Ç oranları 0,25 ve 0,26 olan harç ve betonların uzun süreli lineer otojen rötrelerinin karşılaştırılması

ÖZGEÇMİŞ

16.11.1976 tarihinde Turgutlu'da doğmuştur. Orta öğrenimini Trabzon Fen Lisesi'nde tamamlamıştır. 1998 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi'ni bitirmiş ve aynı yıl İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. 1998 yılında başladığı yüksek lisans programını 2000 yılında tamamlayarak doktora çalışmasına başlamıştır. 2004-2005 döneminde bir yıl süreyle A.B.D.'de Northwestern Üniversitesi İleri Çimento Esaslı Malzemeler Merkezi'nde konuk araştırmacı olarak çalışmıştır. Yapı malzemesi alanında çeşitli ulusal ve uluslararası dergilerde yayınlanmış, sempozyumlarda sunulmuş, betonun sünme ve rötresi, mineral ve kimyasal katkılar başta olmak üzere değişik konularda 25 adet yayını mevcuttur.