

**SÜLFAT ETKİSİNE MARUZ FARKLI ÇİMENTO HARÇLARINDAKİ
MAKRO BOŞLUK YAPISI GELİŞİMİNİN BİLGİSAYARLI
TOMOGRAFİ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

İLKER TEKİN

**DOKTORA TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2010
ANKARA**

İlker TEKİN tarafından hazırlanan “SÜLFAT ETKİSİNE MARUZ FARKLI ÇİMENTO HARÇLARINDAKİ MAKRO BOŞLUK YAPISI GELİŞİMİNİN BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ
Tez Danışmanı, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Metin ARSLAN
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Mustafa TOKYAY
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ

Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Recep BİRGÜL
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, M.Ü.

Tarih:/...../.....

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İlker TEKİN

**SÜLFAT ETKİSİNE MARUZ FARKLI ÇİMENTO HARÇLARINDAKİ
MAKRO BOŞLUK YAPISI GELİŞİMİNİN BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

(Doktora Tezi)

İlker TEKİN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Aralık 2010

ÖZET

Bu çalışmada, sülfat etkisi altındaki çimento harçlarının gözenek yapısı gelişimi Bilgisayarlı Tomografi (BT) kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla çalışmada bağlayıcı malzeme olarak PÇ 42,5R (CEM I) ve SDÇ 32,5 (SRC) çimentoları kullanılmıştır. Çalışmada 40x40x160 mm ve 25x25x285 mm boyutlarında prizmatik çimento harç numuneleri hazırlanmıştır. İlk olarak çimentoların standart kıvam, priz süresi, hacim genleşmesi, yoğunluk ve özgül yüzey gibi fiziksel özellikleri deneylerle belirlenmiştir. Üretilen harç numuneleri standart kürün yanı sıra %5 magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisi ve %5 sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisi etkilerine maruz bırakılmıştır. Harç numuneleri üzerinde boy değişimi, su emme, kapiler su emme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bununla birlikte harç numunelerinin BT ile gözenek gelişimi incelenmiştir. Diğer taraftan harç numunelerinin 28, 70 ve 180 gün yaşlarında mikroskobik analizler yapılmıştır.

BT görüntülerinin analizi için “Matlab” yazılımı kullanılarak yeni bir görüntü analiz programı oluşturulmuştur. Elde edilen BT görüntüleri üzerinde geliştirilen bu yeni program yardımıyla matematiksel analizler yapılmıştır. Deney sonuçları istatistik çözümlerle karşılaştırılmıştır.

Çalışmada elde edilen deney sonuçlarına göre SRC çimentosu CEM I çimentosuna göre sülfata daha çok dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Harç numunelerinde en fazla makro boşluk oranı, en çok basınç dayanımı kaybı ve en fazla boy değişimi %5 Na₂SO₄ çözeltisi etkisinde oluşmuştur. Diğer taraftan SRC'nin yüksek sülfat direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Üretilen harç numuneleri arasında en çok bozulma Na₂SO₄ etkisine maruz CEM I numunelerinde meydana gelmiştir. SEM analizlerinden elde edilen görüntülere göre sülfat etkisine maruz harç numunelerin tamamında yoğun portlandit ve etringit oluşumlarına rastlanmıştır. Ayrıca su içinde kür edilen CEM I ve SRC harç numunelerinin boşluk oranlarında belli bir süreden sonra artış gözlenmiştir. Su emme deney sonuçları BT görüntülerinden elde edilen sonuçlara uyumluluk göstermiştir. Sonuç olarak, BT'nin sülfata maruz çimentolu harçlarda boşluk yapısı gelişiminin analizinde tahribatsız bir yöntem olarak kullanışlı ve hassas, ancak karmaşık bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 714.1.143

Anahtar Kelimeler :Çimento harcı, Sülfat etkisi, Bilgisayarlı Tomografi (BT), Boşluk Gelişimi, SEM

Sayfa Adedi : 213

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

**INVESTIGATION OF MACRO VOID STRUCTURE DEVELOPMENT OF
DIFFERENT CEMENT MORTARS EXPOSED TO SULPHATE ATTACK
BY COMPUTERIZED TOMOGRAPHY
(Ph.D. Thesis)**

İlker TEKİN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
December 2010**

ABSTRACT

In this study, void structure development of different cement mortars exposed to sulfate attack was investigated by Computerized Tomography (CT). For this purpose, the types of cement to be used as cementitious materials in the study were PC 42,5 R (CEM I) and SDC 32,5 (SRC). Prismatic mortar specimens with the dimensions of 40 x 40 x 160 mm and 25 x 25 x 285 mm were produced by using these cements. Initially, physical properties of cements were determined by standard consistency, setting time, soundness, specific gravity and specific surface tests. Produced mortar specimens were exposed to the effects of 5% concentrations of $MgSO_4$ and Na_2SO_4 in addition to standard curing conditions. Length change, water absorption, capillary water absorption and compressive strength tests were performed at different ages. In addition to these tests, the void structure developments of mortar specimens were investigated by CT. Moreover, microscopic analyses of mortar specimens were carried out at the ages of 28, 70 and 180 days.

A custom made image processing program was developed using Matlab software to analyze the CT images. With this developed program, quantitative analyses were performed on the obtained CT images. Utilizing the statistical analyses, several comparisons were made on the obtained experimental results.

According to the obtained test results in the study, it was determined that SRC is more resistant to the sulfate attack than CEM I. The maximum macro void ratio, the biggest loss of compressive strength and maximum length change measurements that occurred in the mortar specimens were those that were exposed to Na_2SO_4 solution with 5% concentration. On the other hand, it was determined that SRC showed high sulfate resistant. The biggest degradation among the produced specimens was occurred to expose Na_2SO_4 solution with 5% concentration in CEM I specimens. The images obtained from SEM exhibited that all the mortar specimens under sulfate attack experienced intensive formation of portlandite and ettringite. Void ratios for the all CEM I and SRC mortar specimens cured with water increased after a certain time. The results obtained from CT image analyses were confirmed by the results obtained from water absorption tests. As a result, CT as a non-destructive testing method has proven to be a functional and sensitive yet complex method in the investigation of macro void structure development of cement mortars exposed to sulfate attack.

Science Code : 714.1.143
Key Words : Cement mortar, Sulfate attack, Computed tomography (CT), Porosity development, SEM
Page Number : 213
Adviser : Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

**Bu doktora tezimi sevgili eşime,
anneme ve babamın anısına
ithaf ediyorum.**

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılmasında hiçbir desteğini sakınmadan her türlü konuda bana yardımcı olan, beni motive ederek çalışmada oluşan ve oluşabilecek sorunların giderilmesini sağlayan değerli tez danışmanım, saygıdeğer hocam Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ'a;

Doktora tezimin tamamlanması sürecinde ilgi, destek ve teşviklerinden ötürü Tez İzleme Komitesi üyeleri, saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Mustafa TOKYAY ve Prof. Dr. Metin ARSLAN'a,

Bilgisayarlı Tomografi sistemini betonun boşluk yapılarını belirlemede kullanabileceğim konusunda bana destek olan ve her türlü imkanlarını seferber eden sevgili kuzenim Gazi Üniversitesi Radyodiagnostik Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Gonca ERBAŞ'a;

Araştırmalarımnda ve deney sonuçlarımın değerlendirilmesi konusunda yardım ve desteğini esirgemeyen, en dar zamanlarında bile gerekli olan bilgiyi bana aktaran, Bilgisayarlı Tomografi görüntülerinin hızlı bir şekilde analiz edilmesini sağlayan Matlab'la hazırlanan “porozite” programını düzenleyerek geliştiren, Muğla iline beni alıştırıran gerektiğinde ağabeylik yapan saygıdeğer hocam Muğla Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Recep Birgül'e;

Doktora tezi çerçevesinde hazırlamış olduğum harç numunelerin zamanında BT ile görüntülenmesini sağlayan, hafta sonları dahil tatil zamanlarını bile bu çalışma için harcayarak bazı önceliklerini bu çalışma için değiştiren Gazi Üniversitesi Bilgisayarlı Tomografi laboratuvarı teknisyenlerinden Seyhan ERDEM'e;

Doktora tez deneylerinde kullanılan harç numunelerin hazırlığı için gerekli olan malzemelerin temininde ve numune hazırlığı için gerekli olan donanımları kullanmak için gerekli izinleri vererek Fizik Laboratuvarlarını her türlü ihtiyacımız için gerektiğinde açan, bilime önem veren Set Çimento A.Ş.'ye bağlı olan Güvercinlik çimento fabrikası yetkililerine ve çalışanlarına;

Çalışmalarına maddi destek sağlayan Türkiye Çimento Müstahsiller Birliği'ne, bu çalışmayı proje olarak kabul eden ve 1002 Hızlı Proje kapsamında değerlendiren TÜBİTAK'a, tezde kullanılmak üzere Na_2SO_4 ihtiyacımızı karşılayan SODAŞ A.Ş. yetkililerine;

Maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili baldızıma ve doktora çalışmalarımın her aşamasında, her anında, her türlü desteğiyle bana güç veren, beni motive eden, maddi ve manevi sıkıntılarımızı güler yüzle karşılayan ve fedakarlıklarını esirgemeyen sevgili eşime teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xvii
RESİMLERİN LİSTESİ	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Çimento.....	7
2.1.1. Portland çimentoları.....	7
2.1.2. Sülfatlara dayanıklı çimentolar.....	8
2.2. Portland Çimentosunun Hidratasyonu.....	9
2.3. Çimentonun Mikro ve Makro Yapısı.....	13
2.4. Çimentolu Sistemlerde Sülfat Saldırısı ve Etkileri.....	16
2.4.1. İç kaynaklı sülfat etkisi.....	18
2.4.2. Dış kaynaklı sülfat etkisi.....	21
2.5. Sülfat Saldırıları Sırasında Gerçekleşen Kimyasal Olaylar.....	29
2.5.1. Alçı oluşumu.....	30
2.5.2. Etringit oluşumu.....	32
2.6. Sülfata Dayanıklılığı Etkileyen Faktörler.....	41

Sayfa

2.6.1. Çözelti ile ilgili faktörler.....	41
2.6.2. Çimento ile ilgili faktörler.....	49
2.6.3. Betonun kalitesi ile ilgili faktörler.....	52
2.7. Sülfat Taşınımı ve Sonrasında Oluşan Hasarın Mekanizmaları.....	54
2.7.1. Gollop ve Taylor modeli.....	54
2.7.2. Haynes modeli.....	57
2.7.3. Bonen ve Cohen modeli.....	57
2.7.4. Santhanam ve arkadaşlarının modeli.....	58
2.8. Sülfat Etkisini Belirlemek İçin Kullanılan Deney Yöntemleri.....	60
2.8.1. ASTM C452 ve ASTM C1012 ile genleşme miktarının belirlenmesi.....	60
2.8.2. Fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi.....	62
2.8.3. Mikro yapısal özelliklerin belirlenmesi ve görüntüleme sistemleri ile sülfat atağı etkilerinin belirlenmesi.....	65
2.9. Bilgisayarlı Tomografi.....	67
2.9.1. Bilgisayarlı Tomografinin Tanımı.....	67
2.9.2. BT Nesilleri.....	68
2.9.3. BT'nin çalışma prensipleri.....	71
2.9.4. X-ışını soğurulma prensipleri.....	72
2.9.5. Tarama süreci.....	76
2.9.6. Yeni görüntü oluşturma temelleri.....	77
2.9.7. BT'de oluşan görüntü hataları.....	80
2.9.8. X-ışınının madde üzerindeki etkileri.....	84

Sayfa

2.9.9. BT'lerin kalibrasyonu.....	85
2.9.10. Bilgisayarlı Tomografi ile ilgili yapılmış önceki çalışmalar.....	86
3. MATERYAL VE METOT.....	90
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	90
3.1.1. Çimento.....	90
3.1.2. Kum.....	90
3.1.3. Su.....	90
3.1.4. Sodyum Sülfat ve Magnezyum Sülfat.....	91
3.2. Kullanılan Yöntemler.....	92
3.2.1. Çimento Deneyleri.....	92
3.2.2. Çimento harç çubuklarının hazırlanışı ve boy değişimi deneyi.....	93
3.2.3. Basınç dayanımı deneyi.....	96
3.2.4. Su emme deneyi.....	98
3.2.5. Kapiler su emme deneyi.....	99
3.2.6. BT ile hava boşluklarının belirlenmesi deneyi.....	100
3.3. İstatistik Analiz ve Değerlendirme.....	110
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	112
4.1. Boy Değişimi Deneyi.....	112
4.2. Basınç Dayanımı Deneyi.....	117
4.3. Su Emme Deneyi.....	131
4.4. Kapiler Su Emme Deneyi.....	141
4.5. Bilgisayarlı Tomografi Yöntemiyle Hava Boşluklarının Gelişim analizi.....	144

Sayfa

4.6. Çözeltilerin pH Değişimleri.....	175
4.7. Verilerin Çapraz Değerlendirilmesi.....	177
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	182
5.1. Sonuçlar.....	182
5.1.1. Boy değişimi	182
5.1.2. Basınç dayanımı	182
5.1.3. Su emme	183
5.1.4. Kapiler su emme	183
5.1.5. BT ile makro boşluk gelişimi analizi	184
5.2. Öneriler.....	186
KAYNAKLAR.....	187
EKLER.....	199
Ek-1 Deney resimleri.....	200
Ek-2 SEM görüntülerinin EDS diyagramları.....	204
Ek-3 BT ön çalışma tomografi görüntüleri.....	207
ÖZGEÇMİŞ.....	211

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. SRC'lerin standartlara uygunluk kriterleri.....	9
Çizelge 2.2. Portland çimentolarının hidrasyonu.....	10
Çizelge 2.3. Portland çimentosunun ana bileşenlerinin bazı özellikleri.....	10
Çizelge 2.4. Betonda hasar oluşumunu etkileyen faktörler.....	28
Çizelge 2.5. Sülfat etkisine maruz betonlar için öneriler.....	29
Çizelge 2.6. CEMBUREAU sülfat agresifliği limitleri.....	42
Çizelge 2.7. Çeşitli maddelerin BT numaraları (HU).....	76
Çizelge 3.1. CEM I, SRC çimentoları ve Standart CEN kumunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	91
Çizelge 3.2. Kullanılan suların kimyasal özellikleri.....	91
Çizelge 3.3. Na ₂ SO ₄ ve MgSO ₄ 'ın özellikleri.....	92
Çizelge 3.4. Boy uzama harç numunelerinin referans numaraları.....	94
Çizelge 3.5. Basınç dayanımı deney numunelerinin referans numaraları.....	96
Çizelge 3.6. Su emme deneylerinde kullanılacak numunelerin referans numaraları.....	98
Çizelge 3.7. Kapiler su emme deneylerinde kullanılacak numunelerin referans numaraları.....	100
Çizelge 3.8. GE marka Lightspeed VCTi model BT sisteminin özellikleri.....	100
Çizelge 3.9. BT tarama ayarları.....	102
Çizelge 3.10. BT'de görüntüleme yapılacak deney numunelerinin referans numaraları.....	108
Çizelge 4.1. CEM I çimento harç çubuklarının boy değişimi istatistik momentleri.....	112

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.2. SRC çimento harç çubuklarının boy değişimi istatistik momentleri.....	113
Çizelge 4.3. CEM I harç numunelerinin basınç dayanımı istatistik momentleri... ..	118
Çizelge 4.4 SRC harç numunelerinin basınç dayanımı istatistik momentleri.....	125
Çizelge 4.5. Su emme deney sonuçları (Kuru ve Görünür özgül ağırlık).....	131
Çizelge 4.6. Su emme deney sonuçları (Ağırlıkça su emme ve Görünür boşluk oranı).....	132
Çizelge 4.7. 560 gün yaşında BT’de görüntülenmiş numunelerin su emme deneyinden elde edilen sonuçlar	141
Çizelge 4.8. Harç numunelerden elde edilen kapiler su emme deney sonuçları.....	142
Çizelge 4.9 Matlab’ten elde edilen CEM I harç numunelerinin makro boşluk oranı gelişimleri	146
Çizelge 4.10 Matlab’ten elde edilen SRC harç numunelerinin makro boşluk gelişimleri.....	148
Çizelge 4.11. X-ışını almış numunelerin HU değerlerinin zamana bağlı gelişimi.....	151

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çimento hamurundaki ana bileşenlerin dayanım artışıdaki rolleri.....	10
Şekil 2.2. Hidrate çimento hamurundaki gözeneklerin ölçüleri	15
Şekil 2.3. Çeşitli C-S-H modellerinin şematik gösterimleri.....	16
Şekil 2.4. PÇ hamurunun mikro yapısal gelişimi	16
Şekil 2.5. Betonun yüksek ısıya maruz kalmasıyla monosülfatın C-S-H jelleri arasına yerleşmesi ve soğurken çevreden gelen nemin etkisiyle etringit oluşumu	20
Şekil 2.6. Etringit oluşumuyla agrega çevresinde ve hamurda çatlak oluşumu.....	21
Şekil 2.7. SO_3 ve Al_2O_3 oranına göre etringit oluşumu.....	21
Şekil 2.8. Etringit kristalinin yapısı.....	34
Şekil 2.9. Sülfat saldırısına maruz sertleşmiş çimento hamur matriksindeki boşluğun şematik görünümü.....	36
Şekil 2.10. pH değerine göre etringit kristallerinin boy ve kalınlık oranları.....	47
Şekil 2.11. Dozaj- C_3A arasındaki ilişkinin parçalanma hızına etkisi.....	51
Şekil 2.12. Betonun sülfat dayanıklılığı ile geçirimsizliği arasındaki ilişki.....	53
Şekil 2.13. Na_2SO_4 'a maruz PÇ hamurunun yüzeyinde oluşan kimyasal olay.....	55
Şekil 2.14. Na_2SO_4 'a maruz PÇ hamurunun hasar mekanizması.....	55
Şekil 2.15. Na_2SO_4 'a maruz SRPC hamurunun yüzeyinde oluşan kimyasal olay.....	56
Şekil 2.16. $MgSO_4$ 'a maruz PÇ hamurunun kenarında oluşan kimyasal olay	56

Şekil	Sayfa
Şekil 2.17. $MgSO_4$ 'a maruz PÇ hamurunun yüzeyinde oluşan kimyasal olay.....	59
Şekil 2.18. $MgSO_4$ 'a maruz SRPC hamurunun yüzeyinde oluşan kimyasal olay.....	59
Şekil 2.19. Na_2SO_4 atağı için önerilen mekanizma.....	60
Şekil 2.20. $MgSO_4$ atağı için önerilen mekanizma.....	60
Şekil 2.21. Elektromanyetik spektrum.....	68
Şekil 2.22. BT aygıtının gelişimi.	69
Şekil 2.23 BT'nin kaynak ve detektör geometrisi.....	70
Şekil 2.24. BT'nin çalışma prensibi ve açıklaması.....	72
Şekil 2.25. X ışınlarının atenuasyonu (sayıca azalması).....	73
Şekil 2.26 BT sisteminin bir parçası olan gantry.....	77
Şekil 2.27. Lineer atenuasyon katsayısı görüntüleme örneği.....	77
Şekil 2.28. Tekrarlı yeniden oluşturma örneği.....	79
Şekil 2.29. Geometrik Artifakt (Ring Artifaktı).....	84
Şekil 2.30. Kalibrasyon yığın yoğunluğu için eğrisi.....	85
Şekil 3.1. Matlab programında tomografilerin incelenme ara yüz görüntüsü.....	105
Şekil 3.2. Bir tomografi kesitinin Matlab programında piksel haritasının gösterimi.....	107
Şekil 4.1. CEM I çimentolu harç çubukların boy değişimi grafiği.....	114
Şekil 4.2. SRC çimentolu harç çubukların boy değişimi grafiği.....	114
Şekil 4.3. CEM I harç numunelerinin basınç dayanımı – numune yaşı grafiği.....	123
Şekil 4.4. SRC harç numunelerin basınç dayanımı – numune yaşı grafiği.....	126

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. CEM I ve SRC harç numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları regresyon grafikleri.....	130
Şekil 4.6. Harç numunelerin fiziksel özellik – numune yaşı sütun grafikleri.....	137
Şekil 4.7. Kapiler su emme deneyi verilerinin numune yaşına bağlı değişim grafiği	144
Şekil 4.8. CEM I ve SRC harç numuneleri için HU dağılım eğrileri.....	145
Şekil 4.9. Suda, Na ₂ SO ₄ ve MgSO ₄ çözeltisinde bekletilmiş x-ışınına maruz harç numunelerin HU gelişimi regresyon grafikleri, denklemleri ve R ² değerleri.....	153
Şekil 4.10. 2 gün yaşında PST1 harç numunesinin 3D topografyası.....	158
Şekil 4.11. 2 gün yaşında PST1 harç numunesi gözeneklerin 3D topografyası.....	159
Şekil 4.12. 2 gün yaşında PST1 harç numunesinin büyütülmüş kısmın 3D bölümü.....	159
Şekil 4.13. CEM I harç numunelerinin ortalama gözenek oranlarının gelişim regresyon grafiği.....	159
Şekil 4.14. SRC harç numunelerinin ortalama gözenek oranlarının gelişim regresyon grafiği.....	160
Şekil 4.15. PNT1 numunesinin farklı süreçlerdeki 3 boyutlu görüntüleri.....	164
Şekil 4.16. 560 gün yaşındaki SNT 3 numunesinin 3 boyutlu modellemesi.....	167
Şekil 4.17. 560 gün yaşındaki SNT 3 numunesinin makro boşluklarının 3 boyutlu modellemesi.....	167
Şekil 4.18. PMT harç numunelerinin 3D modellemeleri.....	170
Şekil 4.19 PMT3 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı.....	173
Şekil 4.20 SMT3 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı.....	173

Şekil	Sayfa
Şekil 4.21 PNT3 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı.....	173
Şekil 4.22 SNT3 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı.....	174
Şekil 4.23 PST1 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı.....	174
Şekil 4.24 SST1 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı.....	174
Şekil.4.25. Kür suyu ve sülfat çözeltilerinin pH değerlerinin zamana göre değişimi.....	176
Şekil 4.26. Basınç dayanımı deney sonuçları ile ağırlıkça su emme oranı sonuçlarının karşılaştırma grafikleri.....	178
Şekil 4.27. Basınç dayanımı deney sonuçları ile görünür özgül ağırlık sonuçlarının karşılaştırma grafikleri.....	179
Şekil 4.28. Basınç dayanımı deney sonuçları ile makro boşluk oranı sonuçlarının karşılaştırma grafikleri.....	180
Şekil 4.29. Makro boşluk oranı ile görünür boşluk oranı sonuçlarının karşılaştırma grafikleri.....	181
Şekil 4.30. BT deney numunelerinin HU değerleri gelişimi ile görünür özgül ağırlık sonuçlarının karşılaştırma grafikleri.....	181

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Alçı kristallerinin elektron ve optik mikroskopta görüntüleri.....	31
Resim 2.2. Etringit kristallerinin optik mikroskop ve tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri.....	34
Resim 3.1.a. Harç numunelerin VCTi model BT’de yerleştirilmesi.....	101
Resim 3.1.b. Harç numunelerin VCTi model BT’de görüntülenmesi sonucunda elde edilen resim.....	101
Resim 3.2. BT’de CEM I çimento harç numuneleri.....	108
Resim 3.3. BT’de SRC çimento harç numuneleri.....	109
Resim 3.4. BT’de CEM I ve SRC numuneleri ile kalibrasyon numuneleri.....	109
Resim 4.1. PMU harç çubuklarında 27 hafta sonunda oluşan tuz kristalleri.....	117
Resim 4.2. SMU harç çubuklarında 27 hafta sonunda oluşan tuz kristalleri.....	117
Resim 4.3. 560 gün yaşındaki Na ₂ SO ₄ çözeltisine maruz CEM I harç numunesi.....	119
Resim 4.4. PMB ve SMB numunelerin 110 gün yaşındaki görüntüleri.....	120
Resim 4.5. PMB ve SMB numunelerin 360 gün yaşındaki görüntüleri.....	121
Resim 4.6. Na ₂ SO ₄ çözeltisi içinde 560 gün yaşındaki CEM I ve SRC numuneleri.....	123
Resim 4.7. 280 gün yaşında CEM I harç numunelerinin toplu görünümü.....	124
Resim 4.8. PNB harç numunelerinin 360 gün sonundaki görüntüleri.....	124
Resim 4.9. 360 gün yaşındaki SNB numunelerinin yüzeyindeki gözeneklerin durumu.....	129
Resim 4.10. 360 gün yaşındaki PNB numunelerinin yüzeyinde oluşan bozulmalar.....	129

Resim	Sayfa
Resim 4.11. 360 gün yaşındaki SMB numunelerinin yüzeyindeki gözeneklerin durumu.....	129
Resim 4.12. 360 gün yaşındaki PMB numunelerinin yüzeyinde oluşan bozulmalar.....	129
Resim 4.13. Su emme deneyi yapılmış numunelerin görüntüleri.....	140
Resim 4.14. 28 gün yaşındaki su içinde kürlenmiş harç numunelerin SEM görüntüleri.....	156
Resim 4.15. 70 gün yaşındaki su içinde kürlenmiş harç numunelerin SEM görüntüleri.....	156
Resim 4.16. 180 gün yaşındaki PST harç numunelerin SEM görüntüleri.....	156
Resim 4.17. 180 gün yaşındaki SST harç numunelerin SEM görüntüleri.....	157
Resim 4.18. 28 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri.....	162
Resim 4.19. 70 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri.....	162
Resim 4.20. 180 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri.....	163
Resim 4.21. PNT 2 referanslı numunenin çeşitli süreçlerde aynı bölgeden alınmış kesit görüntüleri.....	166
Resim 4.22. PMT harç numunelerinin boşluk oranı gelişimi.....	169
Resim 4.23. 28 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri.....	170
Resim 4.24. 28 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri.....	170
Resim 4.25. 70 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri.....	170
Resim 4.26. 180 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri.....	170

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
CaO	Sönmemiş kireç
SiO₂	Silis
Al₂O₃	Alümin
Fe₂O₃	Demir oksit
CaSO₄.2H₂O	Alçıtaşı
Ca₃SiO₅=C₃S	Trikalsiyum silikat
Ca₂SiO₄=C₂S	Dikalsiyum silikat
Ca₃Al₂O₆=C₃A	Trikalsiyum alüminat
Ca₄Al₂Fe₂O₁₀=C₄AF	Tetrakalsiyum alüminaferrit
MgO	Magnezyum oksit
SO₃	Sülfit
Ca(OH)₂	Portlandit
C-S-H	Kalsiyum-Silikat-Hidrat (Tobermorit)
3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.31H₂O	Etringit
C₃AH₆	Kübik hidrogarnet
C/S	Kireç/Silikat
C₄ASH₁₂	Kalsiyum-alümina monosülfhidrat
C₆AS₃H₃₂	Kalsiyum-alümina-trisülfhidrat (Etringit)
Na₂SO₄	Sodyum sülfat

Simgeler**Açıklama****MgSO₄**

Magnezyum sülfat

OH⁻

Hidroksil

MSH

Magnezyum-silikat-hidrat

MH

Magnezyum hidroksit

AgBr

Gümüş bromür

 μ

Lineer atenuasyon katsayısı (BT için)

 μ

Aritmetik ortalama (İstatistik analiz)

 σ

Standart sapma

C_{yx}

Varyasyon katsayısı

Kısaltmalar**Açıklama****PÇ**

Portland Çimentosu

SDÇ=SRC= SRPC

Sülfata Dayanıklı Çimento

NIST

Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü

NRC

Nükleer Düzenleme Komisyonu

S/Ç

Su/Çimento oranı

S/B

Su/Bağlayıcı oranı

SEM

Tarayıcı Elektron Mikroskobu

MRI

Manyetik Rezonans

BT

Bilgisayarlı Tomografi

CT

Computerized Tomography

HU

Hounsfield Unit

EN

Avrupa Standardı

Kısaltmalar	Açıklama
TS	Türk Standardı
ASTM	American Society for Testing and Materials
A/F	Alümin/Demiroksit oranı
Eş.	Eşitlik
GEO	Gecikmiş Etringit Oluşumu
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
UK	Uçucu kül
EDXRD	Enerji dağıtıcı x-ışını difraksiyonu
XRD	X-ışını difraksiyonu
CEMBUREAU	Avrupa çimento birliği
SD = SF	Silis dumanı
EDAX=EDS	Enerji dağıtıcı x-ışını difraksiyonu
ATD/TG	Analysis Thermo-Differential/Thermo-Gravimetric
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
MIP	Civa püskürtmeli porozimetre
UPV	Ultrasonik ses hızı
YFC	Yüksek fırın cürufu
P	Elektron yoğunluğu
Z	Atom numarası
KeV	Kiloelektronvolt
AE	Akustik Emisyon
mA	miliamper

Kısaltmalar**Açıklama****DICOM**Digital Imaging and Communication of
Medicine**OPC**

Ordinary Portland Cement

Ort.

Ortalama

1. GİRİŞ

Çimento, suyla karıştırıldığında sertleşen hidrolik bir bağlayıcıdır. Portland çimentosunun ana hammaddeleri kil ve kireçtaşıdır. Bu iki malzeme karıştırılıp öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıkta döner fırında (~ 1450 °C) pişirilir ve bilya büyüklüğüne sahip Portland klinkeri oluşur. Klinker öğütüldükten sonra su ile birleştiğinde çok çabuk katılaşır. Katılaşma süresini uzatmak için klinker öğütülürken %3–5 oranında alçı taşı eklenir. Böylece Portland Çimentosu (PÇ) elde edilmiş olur [1–9]. Portland klinker tabanlı hidrolik çimentoların kullanıldığı betonların dayanıklılığını yitirmesi sonucunda; dünya üzerinde yıllık çimento tüketimi 1999 yılı itibariyle 1,6 milyar tona ulaşmıştır. Bu durum ekonomiye ve çevreye çok büyük bir darbe vurmaktadır [10]. Endüstrileşmiş ülkelerde yapı endüstrisinin toplam kaynaklarının %40'ından fazlasının mevcut yapıların bakımı ve onarımına, %60'ından azının yeni yapılara ayrıldığı ifade edilmektedir [11]. Malzeme dayanıklılığı arttıkça çevreyle ilgili faydalar sağlanmaktadır. Yapı endüstrisinde kullanılan dayanıklı betonlar sürdürülebilir gelişme üzerinde yararlı etkiler oluşturmaktadır [12].

PÇ betonunun dayanıklılığı birçok kimyasal bozunma süreci tarafından tehlike altındadır. Örneğin alkali-agrega reaksiyonları, karbonatlaşma, nötr yada asidik yer altı suyunun malzeme içine nüfuz ederek malzemenin ayrışmasına sebep olması gibi faktörler sayılabilir. Sülfat atağı bozunma hasarlarının en önemlilerinden biridir [13]. Sülfatlı ortamdaki betonun dayanıklılığı, betonun performansını ve servis süresini etkiler. Bu konu halen çeşitli kuruluşlar ve üniversitelerde görevli bilim adamları tarafından araştırılmaktadır [14].

Yapılan çalışmalarda sülfat atağının geniş çeşitlilikte çevre koşullarında oluşabildiği belirlenmiştir [11, 15–17]. Beton bir yapı (beton temeller ya da istinat duvarları gibi) yeraltı suyunda çözülmüş sülfat iyonlarıyla, kanallarda atık suyla (örneğin beton kanallar ve barajlar), deniz suyu veya asit yağmurları ile buluşabilir. Sülfat iyonları betona dış ortamdan penetre olur ve sertleşmiş çimento hamurundaki bazı bileşiklerle reaksiyona girerek yapının bozulmasına sebep olabilir. Sülfat atağı; çatlama,

parçalanma, genleşme oluşumu ile kütle, adezyon kuvvet ve dayanım kaybı ile gözlemlenebilir [11]. Yapılan araştırmalarda genleşme kaynaklı hasarların ve çatlakların birincil sebebinin etringit oluşumu olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda adezyon kuvvet ve dayanım kaybının birincil sebebinin alçı oluşumunun bir sonucu olduğu yaygın bir varsayımdır. Elektrik tesislerinin temelleri, kanallar, boru hatları, otoyol kaplamaları, barajlar ve konut yapı temelleri gibi geniş çapta halkın kullandığı yapılardan bazıları sülfat atağından etkilenmektedir.

Betonda sülfat atağı ile ilgili 60 yıldan fazla süredir araştırma yapılmakta olup, reaksiyon ve hasar mekanizmalarının sonuçları halen tam olarak anlaşılamamıştır. Sülfatça zengin bölgelerin yapılaşmasında sülfat atağına karşı kullanılacak malzemelerin direncini artırmak için; öncelikle reaksiyon ve hasar mekanizmalarını iyi anlamak, sonrasında seçilen malzemeler, karışım oranları ve yapıların tasarımını geliştirmek gereklidir. Ancak sülfat atağının mekanizmasıyla ilgili bilgi tamamlanamamıştır. Aynı zamanda uygun test metotları bulmak zor olmakla birlikte değerlendirilen sonuçlar tatmin edicidir [18]. Güvenlik açısından düşünüldüğünde toksik ve nükleer atıkların beton muhafazalı kazanlarda depolanması kritik bir durumdur. Çünkü betonun hasara uğrayacağı sürenin tahmini mümkün değildir. Süreklilik açısından bu tip yapıların tasarım ve yapımında daha dikkatli yaklaşım gereklidir [19, 20]. Yapılan çalışmaların amacı sülfat atağına karşı betonun direncini standart metot belirleyerek ya da düzenleyerek daha hatasız değerlendirebilmektir [18]. Mevcut standartlar betonun sülfat direnci konusunda saha çalışmalarının yeterli olmaması sebebiyle eleştirilmektedir. Bu standartların yeniden kontrolünün gerektiği düşünülmektedir [21]. Bu sebeple sülfat atağına dirençli beton karışım tasarımı yapmak zorlaşmaktadır. Bu sorunun çözülmesi için düşünülen bazı sorular şunlardır:

- Ne tip mekanizmalar etringit oluşumuna sebep olur? Bunlar hangi koşullarda oluşur?
- Genleşme mekanizması ve etringit oluşumunu etkileyen kalsiyum hidroksit (CaOH_2) nasıl meydana çıkar?
- Sülfat atağından kaynaklanan hasarlarda alçı oluşumunun rolü nedir [21] ?

- Farklı sülfat tuzlarının s/ç oranı ve çimento kompozisyonu üzerindeki etkileri nelerdir [22]?
- Farklı durumlarda sülfat atağı sürecini değerlendirmek için uygun test parametreleri nelerdir [21, 23]?
- Sülfatlı çevre koşullarına maruz kalan betonun geriye kalan servis ömrünü önceden bildiren metotlara ne kadar güvenilebilir [21]?
- Mevcut bilgiden ve sürekli yenilenen alan verilerinden geliştirilen kütle taşınma özellikleri ve kimyasal dayanıklılık arasındaki ilişkiye bağlı sülfat atağı, genel uygulamalar için nasıl modellenilebilir [24] ?

Sülfat etkisine maruz betonlarda basınç dayanımının ve genleşmelerin düzenli aralıklardaki değerleri beton performansının bir belirtisidir. Betonun harabiyeti belirli fiziksel ölçütlerle tanımlanmıştır. Buna göre basınç dayanımının en alt sınırı ve genleşmenin en üst sınırı tanımlanarak, betonun performans tahmini belirli ölçütlerle yapılabilmektedir [25].

Çimento harçları; çimento, kum ve sudan oluşan heterojen bir yapı malzemesidir. Beton ile arasındaki tek fark bünyesinde iri agrega bulunmamasıdır. Bu sebeple betona referans bir malzemedir. Betonda dayanım, dayanıklılık, ekonomi ve fonksiyonelliğin sağlanabilmesi için; uygun malzeme seçimi, kontrollü üretim ve uygun kür yapılması gerekmektedir. Son 10 yılda beton teknolojisinde meydana gelen gelişmeler ile betondan beklenen özellikler; dayanım, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik olmak üzere 3 başlık altında toplanmıştır. Bu üç faktör birçok özelliğin ve etkinin kontrolü altındadır. Bunlardan bazıları genel olarak şunlardır:

- Karışım malzemelerine ait özellikler: s/ç veya s/b oranı; agreganın tane-boyut ilişkisi, agreganın gradasyonu, agreganın boşluk yapısı, agreganın petrografik yapısı; karışım ve kür suyunun özellikleri, çimentonun inceliği, malzemelerin özgül ağırlıkları gibi...
- Harcın karıştırılmasıyla ilgili faktörler: Malzemelerin karışım sırası ve süresi, karıştırma aparatının geometrik yapısı, ortam sıcaklığı ve nem miktarı gibi...

- Kalıpla ilgili faktörler: Kalıp malzemesinin yapısı (metal, ahşap vb), kalıbın fiziksel dokusu, kullanılan kalıp yağlarının yapısı ve miktarı
- Sıkıştırma işlemleri ile ilgili faktörler: Sıkıştırma süresi ve yöntemi, sıkıştırma sırasındaki hava şartları gibi...
- Kür ile ilgili faktörler: Kür yöntemi (su içinde, açık havada, nemli ortamda vb.), kür süresi, ortam faktörleri, sıcaklık, basınç gibi...
- Betonun sertleşmesinden sonraki süreçte etkin olan dış etkenler (Asit, sülfat, donma-çözülme, yüksek sıcaklık vb. etkiler)

Bu faktörlerin her biri dayanım, dayanıklılık ve süreklilik için etkili olduğu gibi, dayanım ve dayanıklılığı doğrudan etkileyen porozite için de etkili olmaktadır [1, 2, 7, 11, 26]. Betonun porozitesi etki mekanizmasına göre aktif ve pasif porozite olarak iki grupta değerlendirilmiştir [27, 28]. Diğer bir değerlendirme malzemenin heterojenliğinden kaynaklanan porozite sınıflandırmasıdır. Bu sınıflandırmaya göre betonda, jel boşlukları (nano boyut), kapiler boşluklar (mikro boyut) ve hava boşlukları (makro boyut) bulunmaktadır [29]. Çimento hidratasyonu sırasında çimento taneleri üzerinde jel tabakası oluşur. Jelleşme sebebiyle çimento taneleri hacimce $\sim 2,1$ katı kadar büyür. Böylece heterojen yapıdaki çimento+agrega karışımından oluşan harç içindeki makro ve kapiler boşluklar kapanma eğilimine girer ve böylece dayanım artar [4–7].

Porozitenin önemi, çimentolu sistemlerin özelliklerine olan etkileri dikkate alınarak anlaşılabilir. Bu etkilerden en çok araştırma konusu olanlar şu şekilde özetlenebilir: Donma-çözülme, klor difüzyonu, sülfat ve karbonatlaşma etkileri gibi dayanıklılık ve süreklilik faktörleri ve basınç, eğilmede çekme dayanımı, elastisite gibi dayanım faktörleridir. Araştırmalarda bu etkilerden şu sonuçlara ulaşılmıştır:

Çimentolu sistemlerde mekanik özellikler ile porozite ters orantılıdır. Boşluklu bir betonun veya harcın mekanik dayanımları düşüktür. Aynı zamanda boşluklu bir beton veya harç, kılcal boşluklarla birbirine bağlanmış bir ağ yapısı oluşturur. Bu yapıya sahip bir malzemede geçirimsizlik yüksek mertebede olduğundan dış etkilere

karşı dayanıksız bir malzeme oluşur. Bu durumda betonun donma-çözülme, karbonatlaşma ve sülfat direnci düşük, klor difüzyonu yüksek olmaktadır [30–38]. Çimentolu sistemlerin porozitesi birçok metot kullanılarak gözlemlenmeye çalışılmıştır. Bu metotlar, genel olarak üç grupta değerlendirilmektedir:

1. Teorik deneysel yöntemler: Betonun ağırlığı, hacmi ve yoğunluğuyla ilişkilendirilmiştir. Ancak bu yöntemlerle betonun boşluk yapısı ve dağılımıyla ilgili tam bilgiye ulaşmak mümkün değildir.
2. Pratik deneysel yöntemler: Genel olarak çeşitli gaz ve sıvı maddelerin kütle içine basınçlı olarak emdirilmesi esasına dayandırılmıştır. Bu şekilde tahmini boşluk yapısı belirlenebilmektedir. Bu yöntemler (civa püskürtmeli porozimetre = MIP), porozitenin gelişimi ve betondaki porozitenin dağılımıyla ilgili bilgiyi yeterli derecede sağlayamamaktadır.
3. Diğer deneysel yöntemler: Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Optik mikroskop kullanılarak mikro boşlukların yapısal analizlerini, dağılım ve sınıflandırmalarını yapmak ve Manyetik Rezonans (MRI) kullanarak malzemenin içyapı incelemeleri ve boşlukların gözlemlenmesi [39 – 44].

Yakın geçmişte gelişen yüksek teknolojiye sahip bilgisayarlı görüntüleme sistemlerinin beton teknolojisi çalışmalarında kullanılması sonucunda porozite ile ilgili araştırmalardaki açıkların kapanması düşünülmektedir. Tahribatsız bir deney yöntemi olan Bilgisayarlı Tomografi (BT), malzeme içindeki yapıyı görmek ve analiz etmek için uygun bir yöntemdir. Bu yöntemle çimentolu sistemlerin boşluk yapısı, miktarı, gelişimi ve dağılımı hakkında yüksek doğrulukta görsel bilgiye ulaşmak ve sayısal olarak analiz etmek mümkün olmaktadır. BT sisteminin çalışma prensibi genel olarak çok basittir. BT’de belirli bir mesafeden malzemeye x-ışını gönderilir. Bu x-ışınları malzemedan geçerken bir kısmı malzeme tarafından soğurulur, bir kısmı da malzemedan diğer tarafa geçer. Malzemedan geçen x-ışınları detektörler tarafından yakalanır ve sayısallaştırıldıktan sonra ana bilgisayara gönderilir. Sayısal haldeki veri bilgisayarda matematik algoritmalarla görüntü haline getirilir. Böylece sayısal değerlerle malzemenin katı, sıvı ve gaz fazları dijital olarak görüntülenir ve analiz yapma imkânı kolaylaşır. Malzemelerin x-ışını soğurma

miktarları malzemeyi oluşturan maddelerin atom yoğunluğu ile ilişkilidir. Atom yoğunluğu arttıkça x-ışını soğurma yüzdesi artar. Böylece her bir homojen madde için bir tanımlama aralığı oluşmaktadır. BT tarama yöntemi mükemmel 3 boyutlu çözünürlük ile hızlı, hasarsız ve nicel bir yöntemdir. X-ışını BT ölçümünden tekli ya da çoklu tarama teknikleri ile porozite belirlenebilir. Ancak heterojen malzemelerde porozite belirlemek çok karmaşık bir uygulamadır. Bununla beraber BT zamana yayılı boşluk gelişimi çalışmalarında oldukça kullanışlıdır. BT sistemi ile heterojen yapının boşluk dağılımı, çeşitliliği ve sınıflandırılması görüntülenebilmektedir.

BT sistemi medikal sahada kullanılmasından dolayı tanımlama aralığı da öncelikle medikal alanda belirtilmiştir. Buna göre BT’de hava için -1000, su için 0 değerleri uluslar arası standartlarca kabul edilmiş olup bu ölçek Hounsfield Unit (HU) olarak tanımlanmıştır. Tıp biliminde dokular için HU değerleri geliştirilerek literatüre eklenmiştir. Betonla ilgili çalışmalarla bu ölçeğe eklenmiş bazı değerler bulunmaktadır. Ancak birçok malzeme için HU değeri tanımlanmamıştır [45 - 64].

BT sisteminin diğer porozite ölçüm yöntemlerine göre bazı faydaları vardır. Bununla birlikte oldukça zor bir teknik olduğu bilinmektedir. Hasarsız bir ölçüm tekniği olması ve numuneden her halde (su içinde ya da dışında) ölçüm alınabilmesi en önemli avantajlarından sayılabilir [45–64]. Ayrıca BT sistemi ile malzemenin katı, sıvı ve gaz halleri ile geçiş bölgeleri kolayca tanımlanabilmektedir. Yapı malzemeleri katı, sıvı ve gaz hallerini bir bütün olarak bünyesinde bulundurmaktadır. Çimento harçlarında katı kısımlar çimento ve kumu, sıvı kısımlar boşluk çözeltilerini, gaz kısımlar ise hava boşluklarını ifade etmektedir. Bu kapsamda BT ile çimento harçlarında oluşan hava boşluklarını gözlemlemek mümkündür [45, 64].

Bu değerlendirmeler ışığında çalışmanın amacı; sülfata maruz farklı çimento harçlarının makro boşluk yapılarının gelişimlerini incelemektir. Çalışmanın dayandırıldığı hipotez: “Sülfat etkisindeki çimento harçlarının boşluklarında oluşan alçı ve etringit kristallerinin hacimce genişmesi sonucunda boşluk alanı önce azalmakta sonra çatlama ve kırılmalarla birlikte artmaktadır.” Bu hipotezin geçerliliği BT kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Çimento

TS EN 197-1'e göre [65] çimento, “su ile karıştırıldığında bir hamur oluşturabilen, su ile gerçekleşen tepkimeler ve süreçler kanalıyla gittikçe katılaştıran ve sertleşen, ayrıca sertleştikten sonra su altında kalsa dahi belirli bir dayanıma ve ayrıca hacimsel olarak kalıcı bir dengeye ulaşan, genleşmeyen, çok ince öğütülmüş inorganik bir malzeme, sonuçta hidrolik bir bağlayıcıdır”.

2.1.1. Portland çimentoları

Portland Çimentosu'nun (PÇ) ilkel maddeleri kireçtaşı (kalker) ve kildir. Üretiminde, öncelikle uygun miktarlarda kireç (CaO), silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) içeren hammaddeler belirli oranlarda karıştırılır. Malzeme bu haliyle farin denilen $\sim 700^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip fırınlara iletilir. Kısmen kalsine olmuş malzeme döner fırınlarda $1450 - 1650^\circ\text{C}$ 'ye kadar pişirilir. Pişirme sırasında sıcaklık arttıkça kalsinasyon, sinterleşme ve füzyon reaksiyonları oluşur [66]. Bu aşamalarda kalkerin ayrışması ile CaO , kilin ayrışması ile SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oluşur. Daha sonra bu maddeler sıcaklığın daha da artmasıyla tekrar birleşip silikatları ve alüminatları oluştururlar. Döner fırından çıkan gri renkte ve fındık büyüklüğündeki malzemeye “klinker” denir. Klinker soğutulduktan sonra çimentonun priz sürelerini ayarlamak için %3–5 oranında alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) eklenerek öğütülür. 90μ 'un altında öğütülen toz haldeki malzeme çimentodur ve bağlayıcı özellik kazanmıştır [2, 3]. Öğütülmüş malzemeye su ve kum katıldığında zamanla sertleşen malzemenin renk ve diğer özelliklerinin Leeds kentine yakın olan “Portland” isimli küçük bir adadaki taşlara benzediğini fark eden J. Aspdin, elde ettiği ürüne İngiltere’de “Portland Çimentosu” adıyla bir patent almış ve günümüze kadar bu isimle gelmiştir [1].

Bir PÇ'nin $\sim 90\%$ 'i kimyasal içerik açısından ayrıştırılırsa; %60-65'i CaO , %20-25'i SiO_2 , %7-12'si $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oluşturur. Ancak bu oksitler PÇ’de kendi başlarına değil, döner fırındaki reaksiyonlar sonucunda, karmaşık bileşenler halindedirler.

PÇ'nin %90'ını oluşturan dört ana bileşen trikalsiyum silikat ($\text{Ca}_3\text{SiO}_5=\text{C}_3\text{S}$), dikalsiyum silikat ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4=\text{C}_2\text{S}$), trikalsiyum alüminat ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6=\text{C}_3\text{A}$) ve tetrakalsiyum alüminaferrit ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}=\text{C}_4\text{AF}$)'tir. Geriye kalan %10'luk kısım ise serbest CaO, serbest MgO, SO_3 ve alkali oksitlerle bazı minör oksitlerdir [66]. Tipik bir PÇ klinkeri ağırlıkça %45–65 C_3S , %15–30 C_2S , %6–12 C_3A , ve %6–8 C_4AF karma oksitleri içerir. Kalsiyum silikatlar az miktarda safsızlıkları sebebiyle C_3S (alit) ve C_2S (belit) adını almıştır [67].

Gebhart, Kuzey Amerika'da pazarlanmakta olan portland çimentoları üzerinde 1994 yılında bir araştırma yürütmüştür. Başlıca amaç çimento karakteristikleri üzerinde güncel veriler toplamak ve standartların geliştirilmesine yönelik ihtiyaçları saptamak olmuştur. Sonuçlar özellikle PÇ Tip I ve Tip II'de sülfat miktarı, incelik ve dayanımların 50 yıl önce üretilen çimentodan fazla olduğunu göstermiştir. Ortalama olarak, 1950'lerin çimentosu ile kıyaslandığında günümüz çimentosunda kireç doygunluk faktörü ve C_3S miktarı daha fazladır. Bu bileşim daha düzgündür ancak alkali miktarında biraz fazladır. Benzer şekilde çimento özellikleri de değişmiştir. Bugünün çimentosu daha hızlı dayanım kazanmakta ve daha erken yüksek dayanıma ulaşmaktadır. Çimento özelliklerinde üretimden kaynaklanan değişkenlikler ise azalmıştır [68].

2.1.2. Sülfatlara dayanıklı çimentolar

TS 10157'ye göre [69] Sülfatlara Dayanıklı Çimentolar ($\text{SDÇ}=\text{SRC}$), C_3A miktarı en çok % 5 olan PÇ klinkerinin bir miktar alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ilavesi ile öğütülerek elde edilen hidrolik bağlayıcıdır. Standartta belirtilen üretim ölçütlerine göre; SRC'nin priz başlangıcı 1 sa az olmamalı, en geç 10 saatte sona ermelidir. Toplam hacim genişmesi 10 mm'yi aşmamalıdır. MgO'nin %3'den fazla olması halinde toplam hacim genişmesi 4 saat kaynamadan sonra 2 saat daha kaynatılma sonucu artış göstermemelidir. Özgül yüzeyi $2800 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dan, basınç dayanımı 2 günde 10 MPa, 7 günde 21 MPa ve 28 günde 32,5 MPa'dan az olmamalıdır. Standartlara göre SRC'nin kimyasal özelliklerindeki sınırlamalar Çizelge 2.1'de verilmiştir [69].

Çizelge 2.1. SRC'lerin standartlara uygunluk kriterleri [69, 70]

Kimyasal Özellik	TS 10157 (%)	ASTM C150 (%)
Kızdırma Kaybı	<5,0	<3,0
Çözünmeyen kalıntı	<1,5	<0,75
SO ₃	<3,5	<2,3
MgO	<5,0	<6,0
C ₃ A	<5,0	<5,0
C ₄ AF+2C ₃ A	<25,0	<25,0
Klorür (Cl)	<0,1	-

SRC'nin PÇ'den en önemli farkı C₃A miktarının az olmasıdır. İlave hammadde olarak Fe₂O₃ kullanılır. Tipik analizlerden de görüldüğü gibi sülfat direncini sağlamak için düşük bir C₃A miktarı seçilerek A/F oranını düşürecek şekilde ayarlanmalıdır. Diğer özellikler PÇ ile aynıdır [9].

2.2. Portland Çimentosunun Hidratasyonu

Hidratasyon, PÇ'nin ana bileşenleri (C₃S, C₂S, C₃A ve C₄AF) ile alçı (CaSO₄.2H₂O) ve suyun aralarında oluşturdukları reaksiyonların bütünü olarak tanımlanabilir. Hidratasyon reaksiyonları ekzotermik tepkimeler zinciridir ve belirli bir zaman içinde olup bitmez, sürekli bir olaydır. Başka açıdan tepkimeler azalarak malzemenin ömrü boyunca sürer. Çimento hamurunun dayanımını kazanma süreci hidratasyon reaksiyonlarıyla başlar, prizle (=katılaşma) devam eder ve sertleşme ile son bulur. PÇ toplam dayanımının % 90'lara yakını 28 gün içerisinde kazanmaktadır. Bu süreç içinde hidratasyon çok hızlıdır. Hidratasyon süresince iyi kür edilmiş çimento dayanımlı ve dayanıklı bir yapı sergiler [1, 2]. Hidratasyon sırasında oluşan reaksiyonlar çok karmaşık bir yapıdadır. Bu nedenle ancak yaklaşık ya da ortalama denklemlerle açıklanabilmektedir. Çimento ana bileşenlerinin reaksiyon sonrası hidratasyon ürünleri: kalsiyum silikat ve alüminat hidratlarıdır. Bu ürünler zamanla plastikliklerini kaybeder, bu sürece priz denir; sonrasında da sertleşirler. Hidratasyon kinetiği olarak açıklanabilen bu süreç, çimento ile betonun özelliklerini önemli oranda etkilemektedir [66]. Hidratasyon kinetiği ana bileşenlerin hidratasyon ürünlerinin açığa çıkmasıyla sürer. Çizelge 2.2'de PÇ'nin hidratasyon ürünleri,

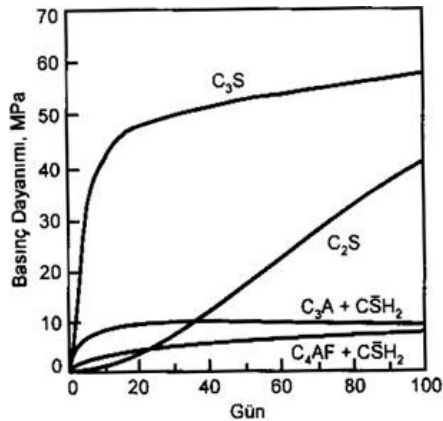
Çizelge 2.3'te ise PÇ'nin hidratasyon sırasında karakteristik özellikleri, Şekil 2.1'de hidratasyon sırasında bileşenlerin mukavemete etkisi gösterilmiştir [1, 2].

Çizelge 2.2. Portland çimentolarının hidratasyonu [9, 71]

Bileşen	Kimyasal Gösterim	Hidratasyon Ürünleri
C ₃ S (Alit)	3CaO.SiO ₂	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O + 3Ca(OH) ₂ (C-S-H jeli=Tobermorit)
C ₂ S (Belit)	2CaO.SiO ₂	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O + Ca(OH) ₂ (C-S-H jeli=Tobermorit)
C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃	3CaO.Al ₂ O ₃ .6H ₂ O
C ₃ A+Alçı	3CaO.Al ₂ O ₃	3CaO.Al ₂ O ₃ .3CaSO ₄ .31H ₂ O (Etringit)
C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	3CaO.Al ₂ O ₃ .6H ₂ O + CaO.Fe ₂ O ₃ .nH ₂ O
Serbest CaO		Ca(OH) ₂
Serbest MgO		Mg(OH) ₂

Çizelge 2.3. Portland çimentosunun ana bileşenlerinin bazı özellikleri

Özellik		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Hidratasyon Hızı		Orta	Düşük	Yüksek	Düşük
Hidratasyon Isısı		Orta	Az	Çok	Az
Bağlayıcı özellik	Erken	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
	Geç	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

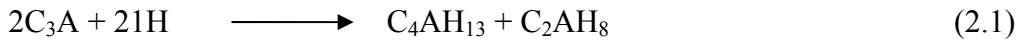


Şekil 2.1. Çimento hamurundaki ana bileşenlerin dayanım artışıdaki rolleri [1]

Hidratasyon sırasında gerçekleşen kalsiyum silikatların reaksiyonları sonucunda oluşan tobermorit jeli (C-S-H) çimento hamuruna bağlayıcılık özelliğini kazandırır. Diğer bir ürün olan portlanditin (Ca(OH)₂) ise bağlayıcılık özelliği yoktur. Ancak

portlandit yapıda dolgu malzemesi olarak işlev görür. Reaksiyon sonucunda açığa çıkan C-S-H jelinin miktarı ne kadar fazlaysa çimento hamurunun kazandığı dayanım o kadar yüksektir [1, 4–7, 11].

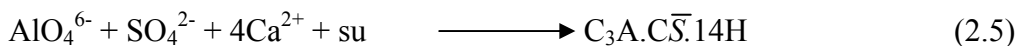
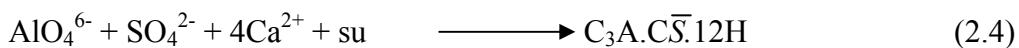
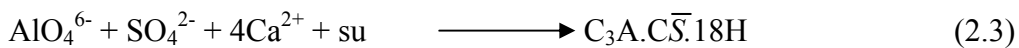
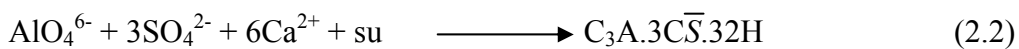
C₃A'nın hidratasyonu sırasında oluşan reaksiyonlar çok hızlı ve yüksek sıcaklıkların açığa çıkmasına neden olurlar. “Eş. 2.1”de görülen bu reaksiyonların sonucunda kalsiyum alümina hidratlar oluşmaktadır. Bunlar kararlı yapıda olmadıkları için kısa süre sonra kararlı formdaki C₃AH₆ yapısına dönüşmektedir [72].



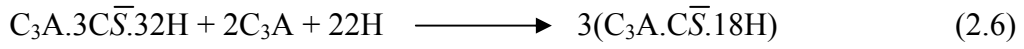
Çimento ile su karıştırıldığında hidratasyon başlar ve aynı zamanda iki olay oluşur:

- Su, CaSO₃ ve CaO’i çözerek alkali bir kalsiyum sülfat çözeltisi oluşturur.
- C₃A suyla ani bir reaksiyona girerek kalsiyum alüminat hidratları oluşturur.

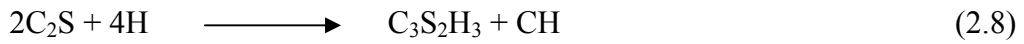
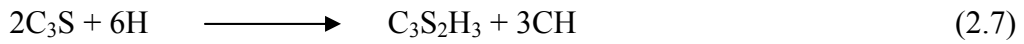
C₃A ve C₄AF fazlarının hidratasyonu sırasında çözeltideki sülfat iyonları ve alüminatın yoğunluğuna bağlı olmak üzere, hidratlar arasında hızlı bir reaksiyon oluşur. Reaksiyon sonucunda etringit (Bkz. Eş. 2.2) ya da mono sülfatlar olarak bilinen kalsiyum mono sülfat hidratlar (Bkz. Eş. 2.3 - Eş. 2.5) yani kristal ürünleri meydana gelir. Bunlar boşluk çözeltisinde çökelirler [25]. Bu oluşum sonrasında çimento hamuruna dışarıdan su ve sülfat giremez. Etringit, alkali CaSO₄ çözeltisinde çok kolay çözünür ve hidratasyona girer. C₃A'nın yüzeyine toplanarak, hidratasyonun ilerlemesini engeller. Böylece etringit tabakasındaki suyun difüzyon hızı, reaksiyon hızı üzerinde etkin olur. Bu sırada etringit monosülfata dönüşür. Bu şekilde çabuk katılaşmanın önüne geçilerek reaksiyon hızı kontrol altına alınmış olur. Bu mekanizma klinkere öğütme aşamasında alçı taşı ilave edilmesiyle sağlanır [9].



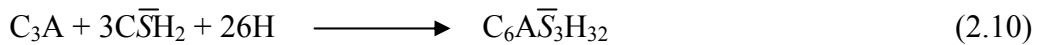
Alçı ve etringitin genişletilmiş formülleri sırasıyla $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ 'dur. Alçı bulunan ortamda C_3A 'nın hidratasyonu sırasında başlangıç olarak alkaliler ve alçı çözeltiye hızlıca girer ve C_3A 'nın çözünürlüğünü önler. Alüminat/sülfat oranının düşük olmasından dolayı etringit genellikle ilk kristalize olan hidrattır. Çimento esaslı malzemelerin katılaşmasına ve sertleşmesine öncülük eder. Sonradan, çözeltideki sülfatın tükenmesiyle ve alüminat fazları uygunken oluşan etringit hidratasyon sürecinin başlangıcında dengesiz bir halde olup zamanla monosülfatlara dönüşür (Bkz. Eş. 2.6) [4, 11, 71].



Hidratasyon reaksiyonlarında tamamen hidrate olan C_3S ve C_2S 'in reaksiyonları sırasıyla verilmiştir:



“Eş. 2.7” ve “Eş. 2.8”de kalsiyum silikat hidratta $\text{C/S}=1,5$ 'tir. Ancak C/S oranı iyi tanımlanmış değildir ve 1,5 – 2,0 arasında olabilir [11]. Çünkü C-S-H için verilen kimyasal oranlar değişkendir. C-S-H formları, kalsiyum silikat ile su moleküllerinin tabakaları arasında kalsiyum iyonları bulunması halindedir [4]. Ara yüzey tabakaları “Van Der Waals” kuvvetleri ile bağlanmış olup PÇ hamurunun dayanımını sağlamaktadır. Öte yandan C_3A , su ve alçıtaşı arasında aşağıdaki reaksiyonlar oluşur.



Yukarıdaki ifadelerden de görüldüğü gibi C_3A , su ve alçıtaşının reaksiyonu sonucu oluşan ürünlerden $\text{C}_4\text{A}\overline{\text{S}}\text{H}_{12}$ (kalsiyum-alümina monosülfhidrat) oluşması çimento hamurunda bir miktar hacim artışına sebep olmaktadır. Plaka şekline sahip bu kristaller yarı kararlı özelihtedir. Fazla miktarda sülfatın bulunduğu ortamlarda “Eş. 2.11”deki gibi $\text{C}_6\text{A}\overline{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ 'ya dönüşürler [72, 73].



$C_6A\bar{S}_3H_{32}$ kalsiyum-alümina-trisülfohidrat, Candlot tuzu veya daha çok bilinen ismiyle “Etringit” olarak adlandırılır. Bu ürüne verilen etringit ismi, doğada aynı isimle anılan bir minerale benzerliğinden gelmektedir. Hekzagonal kesitli ve çubuk şekilli etringit kristalleri oldukça karardır. Bünyesinde 32 molekül su bulunduran etringitin oluşması sonucunda çimento hamurunda oldukça yüksek hacim artışı oluşur [72, 73].

C_4AF 'nin hidratasyonu C_3A 'nın hidratasyon mekanizması ile benzerdir. C_3A 'nın yapısında bulunan bir kısım alüminanın yerini Fe_2O_3 almaktadır. Ortaya çıkan kalsiyum-alümina-sülfohidrat ürünleri $C_4(A,F)\bar{S}H_{12}$ ve $C_6(A,F)\bar{S}_3H_{32}$ bileşimindedir. Bu ürünlerin yanı sıra bir miktar $(A,F)H_3$ oluşmaktadır. Ortamdaki Fe_2O_3 miktarındaki artış reaksiyonun yavaşlamasına yol açar. Çimento üretiminde alçıtaşı kullanılmadığı veya gereğinden az kullanıldığında C_4AF 'nin göstereceği hidratasyon C_3A 'nıniki kadar şiddetli olmasa da oldukça hızlı olup büyük miktarda ısı açığa çıkarır ve ani prize yol açabilmektedir. C_3A oranı düşük ve C_4AF oranı yüksek olan çimentolarla yapılan betonların sülfata oldukça dayanıklı olduğu belirtilmiştir [1, 73].

“Eş. 2.10” ve “Eş. 2.11”de verilen etringit oluşumu birincil etringit oluşumu diye adlandırılır. Birincil etringit oluşumu hızlı ve homojen olup hacim artışı meydana getirir. Fakat bu durum beton için zararlı değildir. Çimento klinkerindeki kalsiyum alümin ile öğütülen alçıtaşıdaki sülfattan kaynaklanır. Taze betonda birincil etringit etkisiyle oluşan hacim artışı betonda meydana gelen büzölmeleri dengeler [74].

2.3. Çimentonun Mikro ve Makro Yapısı

Çimentonun hidratasyonunda kullanılan 4 değişik karakterde su bulunur. Bunlar:

- Serbest su: Cismin boşluklarında bulunan sudur. Sıcaklıkla yapıdan uzaklaşabilir.
- Adsorbsiyon suyu: Cisimlerin yüzeyinde “Van der Waals” kuvvetleri tarafından tutulan sudur. Kristal yapıdaki cisimlerin yüzeyindeki suya “zeolitik su” denir.

- Hidratasyon veya kristalleşme suyu: Cismin yapısındaki sudur. Yapı ile su arasında kimyasal bir bağ yoktur. Bu su cismin molekülleriyle birleşmiştir. Bundan dolayı yapıdaki suyun herhangi bir şekilde ayrılması ile cismin fiziksel yapısı tamamen bozulur. Karışık bileşimlerin su ile yaptıkları reaksiyon sonunda oluşan hidrate elemanlardaki su böyledir.
- Oluşma suyu: Bu haldeki su molekül halinde değildir. Tek valanslı ve negatif elektrik ile yüklü (OH^-) olarak cisim içinde yer almaktadır. Kaolinit içindeki su buna iyi bir örnektir [2].

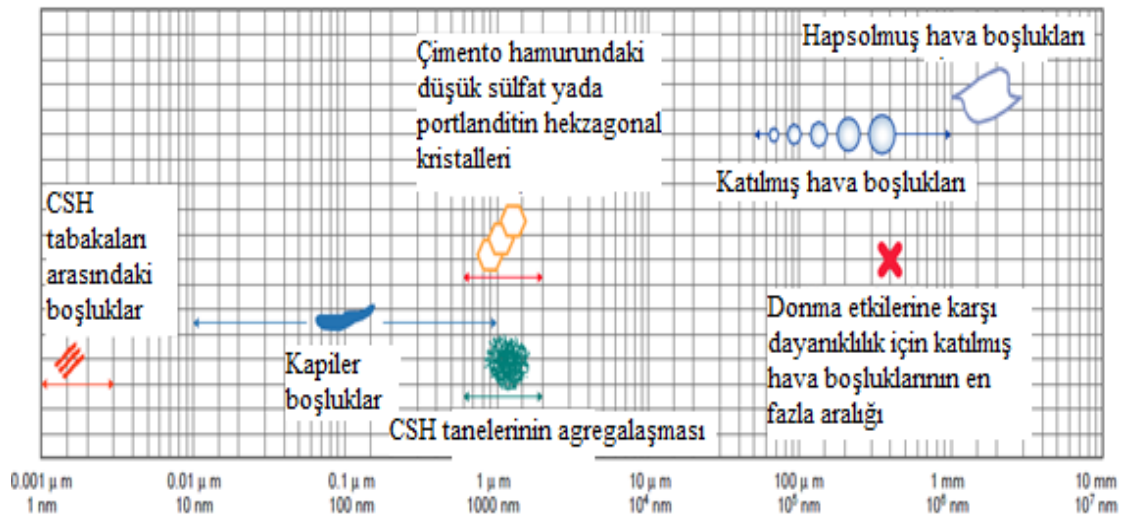
Yukarıdaki şekillerde bulunan suyun miktarları tüm hidratasyon süreci boyunca tepkimeler olurken kullanılarak değişmektedir. Sertleşmenin başlangıcında suyun yaklaşık %50'si "Van der Waals" kuvvetleri ile çimento taneciklerine tespit edilen adsorbe sudur. Çimento hamurunun başlangıçtaki mukavemetinin elde edilmesi için bu adsorbe su gereklidir. Fakat zamanla hidratasyon ilerledikçe adsorbe suyun kalınlığı azalır. Adsorbe su, hidratasyon ve oluşma suyu haline dönüşür. Böylelikle hidrate elemanların miktarının artmasıyla kapiler boşluklar kapanma eğilimine girerken mukavemet zamanla artış gösterir [71].

Hidratasyon sonunda oluşan hidrate elemanlar gelişimini tam olarak tamamlayamadığından düzenli bir kristal yapıya sahip değildirler. Bu açıdan hidrate elemanlar içyapı jel ile kristal yapı arasında kristalit denilen yeni bir içyapı türü oluşturmaktadır. Hidratasyon sonunda oluşan bütün bu cisimler aralarında muhtelif türde boşluklar bırakırlar. Bu boşluklar Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bu boşluklar genel olarak dört sınıfta ele alınır. [11].

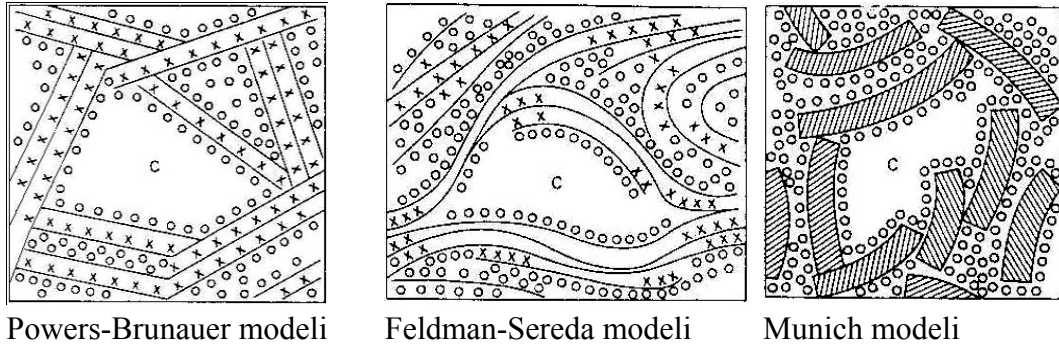
- Makro boşluklar: 10 μm 'den büyük boşluklardır. Bunlar bir miktar kapiler boşluk gibi görünse de, modern literatürde 50 ηm 'den büyük boşluklar makro boşluk olarak tanımlanmıştır [11]. Hava kabarcıkları da bu gruptadır [29].
- Kılcal (Kapiler) boşluklar: 10 ηm - 10 μm arasındaki boşluklardır. Çimento ve su karıştırıldığı anda, çimento hamurunun yapısındaki çimento tanelerinin arasında su dolu küçük boşluklar oluşur. Bu su dolu küçük boşluklar, birbiriyle bağlantılı

kapiler bir sistem meydana getiriler. Bu sırada oluşan hidrasyon ürünlerinin hacmi, hidrasyon yapan çimentonun hacminden daha büyük olduğu için, kapiler boşlukları azaltacak şekilde gelişmektedir. O nedenle, hidrasyon sürdükçe jel miktarı artmakta ve mevcut olan kapiler boşlukların oranı azalmaktadır. S/ç oranı arttıkça kapiler boşlukların miktarı artmaktadır [1].

- Mikro boşluklar: $10^3 \text{ Å} - 10^2 \text{ Å}$ ($1 \text{ Å} = 10^{-7} \text{ mm}$) arasındaki boşluklardır. (50 nm ' den küçük olan boşluklar için mikro boşluk tanımlaması yapılmıştır ve bunlar kuruma rötresi ile büzülme için çok önemli boşluklardır [8].)
- Jel boşlukları: $0,5 \text{ nm} - 4 \text{ nm}$ arasındaki jel boşlukları [29], hidrasyon sonucunda oluşan jellerin yapısında yer alan ve jelin bir parçası olan boşluklardır. Birbiriyle bağlantılı bu boşlukların çapı $\sim 15 - 20 \text{ Å}$ 'dır. Jel üzerinde adsorbe durumda olan suyun mobilitesi çok azdır. Jel boşluklarındaki su, serbest su gibi kolayca hareket edemez, boşlukları kolayca terk edemez ve serbest su gibi 0 °C 'de donmaz. Jel boşluklarındaki su -78 °C 'de donmaktadır. Hidrasyon sonucu oluşmuş olan jelin yapısında, %28 jel boşluğu bulunmaktadır [7]. Hidrasyon devam ettikçe çimento hamurunun içerisindeki jel miktarı ve jel boşluk miktarı artmakta, fakat oran değişmemektedir [1]. (Bkz. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4)

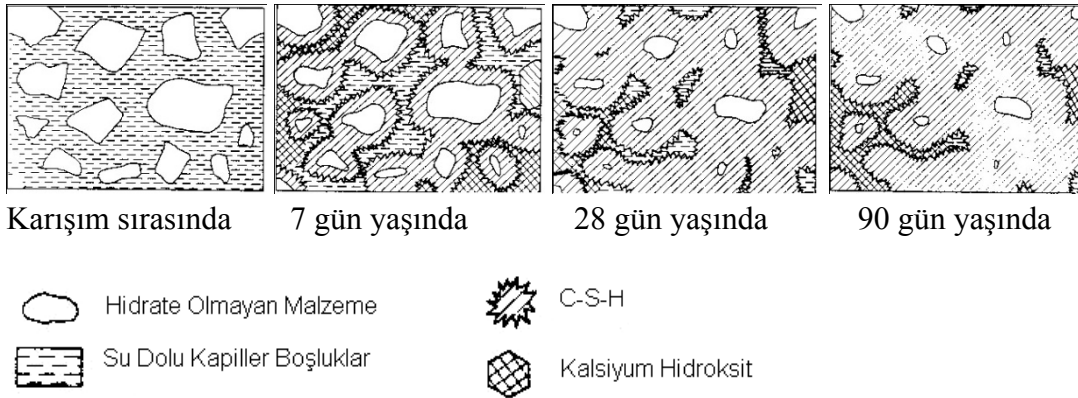


Şekil 2.2. Hidrate çimento hamurundaki gözeneklerin ölçüleri [11]



x Tabakalar arasındaki bölgede bulunan su — C-S-H Tabakaları
 C Kapiler boşlukları
 o Yüzey üzerinde adsorbe edilen su C-S-H Partikülleri

Şekil 2.3. Çeşitli C-S-H modellerinin şematik gösterimleri [29]



Şekil 2.4. PÇ hamurunun mikro yapısal gelişimi [4]

2.4. Çimentolu Sistemlerde Sülfat Saldırısı ve Etkileri

Sülfata maruz çimentolu sistemlerde, iç kaynaklı veya dış kaynaklı olmak üzere iki farklı etki mekanizması bulunmaktadır. İç kaynaklı sülfat etkisi, agregalarda bulunan veya erken yaşlardaki yüksek sıcaklıklar nedeniyle çimento hamurunda oluşan alçının reaksiyona girmesiyle oluşurken, dış kaynaklı sülfat etkisi ise yeraltı suları, deniz suyu, atık sular gibi kaynaklarda bulunan sülfatların betona penetrasyonu sonucunda oluşur. İç kaynaklı sülfat etkisi betonun her bölgesinde oluşabilirken dış kaynaklı etki daha çok yüzeyde ve yüzeye yakın kısımlarda gözlemlenir [66].

Çimentolu sistemlere zarar verebilecek sülfat iyonları zeminlerde, yeraltı sularında ve denizlerde yoğun miktarda bulunmaktadır. Toprakta mineral yapıdaki kükürt genelde demir veya bakır sülfid olarak bulunur. Organik kaynaklı kükürt hayvan ve bitki atıklarından oluşur. Sülfidler oksidasyon ve bakteriyel etki sebebiyle sülfatlara dönüşür. Özellikle tarım alanlarında, zeminlerde ve yeraltı sularında bulunurlar. Başlıca sülfat iyonu kaynakları CaSO_4 , Na_2SO_4 , K_2SO_4 ve MgSO_4 'lardır [66].

Alçının normal sıcaklıklarda eriyebilirliği düşüktür. Bu sebeple, yeraltı sularındaki yüksek miktardaki sülfat iyonları magnezyum ve alkali sülfatlar olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, kimyasal gübre kullanımı sonucunda oluşan amonyum sülfat, yüksek kükürtlü yakıt kullanımı sonucunda oluşan sülfüroz ve sülfürik asit gibi diğer nedenlerle de zeminlerdeki sülfat iyonu miktarı artarak betona zarar verebilecek dereceye ulaşılabilir [66]. Bunların yanı sıra bazı killi topraklarda ve cüruflla doldurulmuş arazilerde oldukça yüksek miktarlarda CaSO_4 , Na_2SO_4 , K_2SO_4 ve MgSO_4 gibi tuzlar bulunabilmektedir [1].

Deniz suları çeşitli tuzları, organik bileşikleri ve eriyik haldeki maddelerle gaz kabarcıklarını, organik ve inorganik halde askıda maddeleri içerirler. Bu karışım yaklaşık 70 farklı element içermektedir. Bu elementlerden en önemlileri Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ ve SO_4^{2-} olup toplam derişimin %99,5'ini oluşturur. Örneğin %3,5 tuzluluk içeren bir deniz suyunda bu iyonlar sırasıyla %19,35, %10,76, %2,71, %1,29, %0,41 ve %0,39 oranında bulunur. Deniz suyundaki ortalama sülfat iyonu derişimi 2750 ppm civarında ve pH değeri 7,5–8,4 arasındadır [66]. Deniz yapılarında, deniz suyundaki sülfatların ıslanma-kuruma bölgesinde buharlaşması sebebiyle betonun sülfat yoğunluğu artar. Sertleşmiş beton içerisine dışarıdan sularla birlikte sızarak giren sülfatlar, betonun genleşip çatlamasına yol açan kimyasal olayların gelişmesine neden olmaktadır. Bu olay sırasında sülfat etkisine maruz betonların yüzeylerinde beyazımsı lekeler gözlenir. Hasar daha çok köşelerde, sivri noktalarda ve birleşim yerlerinde başlar. Daha sonra ilerleyen çatlamalar ve dökülmeler sonucunda beton yumuşayarak ve kırılganlaşır. Bu nedenle de dayanımını ve rijitliğini kaybeder [1, 67].

2.4.1. İç kaynaklı sülfat etkisi

İç kaynaklı sülfat etkisi gecikmiş etringit oluşumu (GEO) ile kendini gösterir. GEO çimentolu sistemlerin sertleşmesinden sonra oluşan sürecin sonunda, tümüyle iç kaynaklı sülfatların sebep olduğu, etringit oluşumudur. GEO genellikle 70°C'nin üzerinde sıcaklığa maruz kalmış betonlarda görülmektedir [66, 75]. Betonun GEO nedeniyle hasar görmesinin aşamaları aşağıdaki şekilde açıklanabilir [76, 77]:

- Yapı içinde yeteri kadar sülfat bulunması,
- Yüksek sıcaklıkta küre tabi olan (65°C<) C-S-H jeli tarafından yüksek miktarda sülfat adsorpsiyonu ve geç yaşlarda yavaş sülfat desorpsiyonu oluşması,
- Betondaki reaktif bileşenlerin boşluk suyu tarafından beton içinde mevcut olan çatlaklara taşınması,
- Rutubetli ortamda reaktif bileşenlerin tümüyle difüzyonun sağlanması,
- Çatlaklarda etringit oluşumu ve mevcut çatlakların büyüyerek betona zarar vermesi.

Çimentonun hidratasyonu sırasında fazla miktarda SO_3 ve Al_2O_3 bulunması sonucunda betonun sertleşmesinden sonra uygun çevre şartları altında kimyasal reaksiyonlar oluşarak çimento hamurunda ve agrega ara yüzeyinde etringit meydana gelebilmektedir [10, 74, 78]. Çevre sıcaklığının altında üretilen betonlarda aşırı miktarda sülfat veya sülfür içerikli bileşikler varsa sertleşmiş beton için zararlı durum oluşturabilir. Betona çimento ile birlikte katılan sülfatlar, alitlerle (C_3A ve CA) ve az kısmı da ferritlerle (C_4AF) reaksiyona girerek tüketilirler. Aşırı miktardaki SO_4^{2-} sertleşmiş betonun hidratasyon ürünü kristalleri arasında kalarak sonradan gelen suyun etkisiyle yavaşça çözünerek yeni etringit grupları oluşturabilir [10].

Collepardi (2003) yaptığı çalışmada, ikincil etringit oluşumunun yavaş gelişen bir olay olduğunu ve zaman içinde yüksek oranda sülfat bulunduran betonlar için zararlı gerilme artışlarıyla genleşmelere neden olabileceğini belirtmektedir [74]. Batic ve arkadaşları (2000), farklı bozulma mekanizmalarına maruz iki tip çimento ile

üretilmiş betonlarda mikro yapısal inceleme yapmışlardır. Çalışmada dış ortamdan sülfat iyonu gelmeden, ıslanma-kuruma gibi dönüşümler uygulanan numunelerde ikincil etringit oluşumuna rastlanmıştır [78].

Üretimi sırasında buhar kürü veya yüksek sıcaklıkta bakım uygulanan yüksek sülfat içerikli çimentolarla yapılan betonlarda iç kaynaklı sülfat etkisine rastlanmıştır [10]. Bu yüksek sıcaklık betonun üretimi sırasında yüksek çevre sıcaklığından veya betonun hidrasyonu ile açığa çıkan ısıdan da kaynaklanabilir. Üretimi sırasında yüksek sıcaklıkta küre maruz betonlarda kürden sonra nemli ortamlarda bulundukları zaman betonda iç kaynaklı sülfat atağı ile etringit oluşmaktadır. Bu etringit oluşumu betonda hacim artışına ve çatlaklara sebep olmaktadır. Buhar kürü gibi yüksek sıcaklıkta üretilen betonlarda bünyedeki sülfattan dolayı etringit oluşumuyla kendini gösteren bu olay literatürde GEO olarak adlandırılmıştır [10, 74].

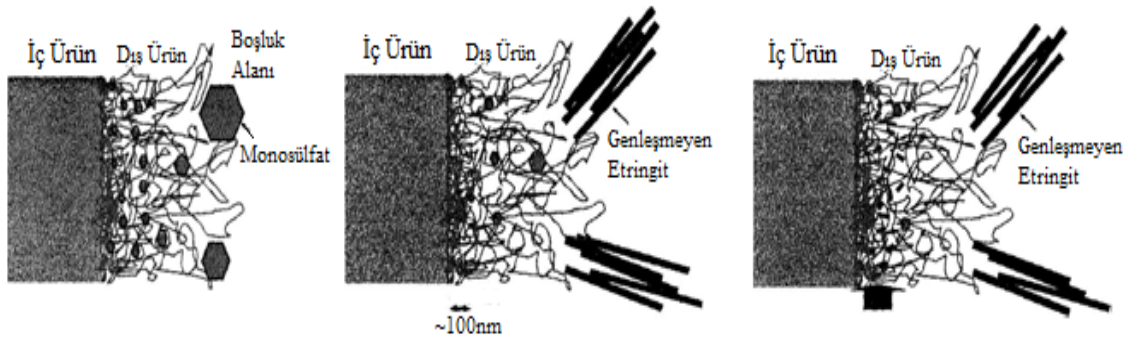
Isıl bozulmanın neden olduğu GEO 1980’li yıllarda ön gerilmeli köprü kirişlerinde rastlanan çatlakların incelenmesi sonucunda ortaya çıkmıştır [78]. Buhar kürü gibi yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda, ilk zamanlarda oluşması gereken etringit kristalleri oluşmayıp, etringit oluşumuna neden olan monosülfatlar C-S-H jelinin kristalleri arasına yerleşmektedir. Yüksek sıcaklıkta üretilen beton normal sıcaklıkta soğumaya bırakıldığında dışarıdan gelen su ve nemin etkisiyle sertleşmiş betonda etringit kristalleri oluşturmaktadır [79]. Bu etringit kristalleri sertleşmiş betonda bulunan hava boşluklarında ve çatlaklarda meydana gelir. Oluşan bu etringit, hacim artırıcı bir ürün olup betonun genişmesine ve çatlamasına neden olmaktadır. Yüksek sıcaklık kürü uygulanan betonlarda yapılan mikroskobik inceleme sonucunda çimento hamurunda ve agrega çevresinde 25–30 μm genişliğinde çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların kısmen veya tamamen sonradan oluşan etringitle dolduğu görülmüştür. Hamurdaki mikro çatlaklarda da etringit oluşumlarına rastlanmıştır [10]. Yapılan araştırmalarda, GEO’da sıcaklığın önemli bir faktör olduğu ve 70 °C’yi aşmayan sıcaklıktaki kürlerde GEO’nun hacim artışına neden olmadığı belirtilmektedir [10, 75, 80].

İç kaynaklı sülfat etkisinde GEO sırasında ana reaksiyonlar C-S-H jelinden, mono sülfatlardan ve gözenek çözeltisinden kaynaklanmaktadır. C-S-H reaksiyona Ca^{2+} , SO_4^{2-} , OH^- , H_2O ; mono sülfat reaksiyona Ca^{2+} , SO_4^{2-} , OH^- , $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, H_2O ; gözenek çözeltisi de H_2O ve SO_4^{2-} sağlamaktadır. Bu ürünlerle birlikte gelişen reaksiyon sonucunda etringit oluşmaktadır [75].

Divet ve Randriambolona (1998) C-S-H jelindeki sülfat iyonunun absorbe edildiğini deneysel olarak göstermişlerdir [79]. GEO'nun sebep olduğu hacim artışıyla ilgili iki ana görüş vardır.

1. Betonun çatlak ve boşluklarında sonradan oluşan büyük etringit kristallerinin hacim artışına neden olduğu belirtilmektedir [75, 81, 82].
2. Çimento hamuru içindeki mikro boşluklarda sonradan oluşan çok küçük etringit kristallerinin hacim artışına neden olduğu belirtilmektedir [75].

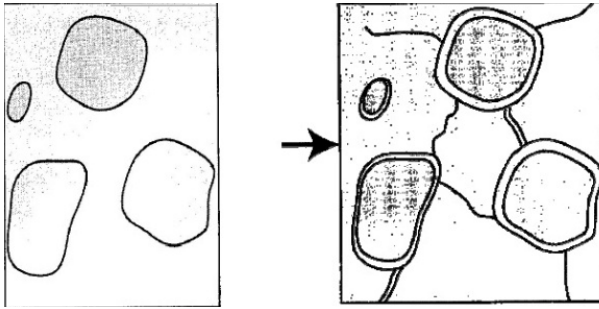
Mikro yapı üzerine yapılan araştırmalar bu görüşlerin her ikisini de desteklemektedir. Bu iki görüş üzerine önerilen hacim artışı mekanizması Şekil 2.5'te gösterilmiştir [10, 75].



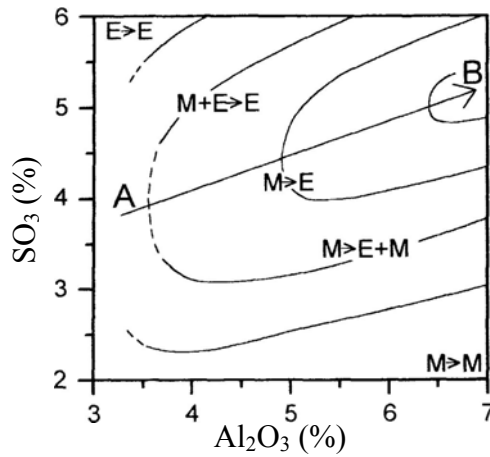
Şekil 2.5. Betonun yüksek ısıya maruz kalmasıyla monosülfatın C-S-H jelleri arasına yerleşmesi ve soğurken çevreden gelen nem etkisiyle etringit oluşumu [10]

Çimento hamurunda bulunan çok sayıda mikro boyutlu gözeneklerdeki kristalleşme basıncı genleşmeye neden olmaktadır. Bu genleşme sonucunda betonda agregaların çevresinde ve çimento hamurunda çatlaklar meydana gelmektedir (Bkz. Şekil 2.6). Bu çatlaklarda etringit ve kalsiyum hidroksit tekrar kristalleşmektedir. Ancak

meydana gelen çatlaklar yeterince büyük olduğunda tekrar kristalleşen etringit bir iç gerilme oluşturmamaktadır [10, 75]. İç kaynaklı sülfat etkisini Şekil 2.7’de gösterildiği gibi, çimento tipi ile çimentoda bulunan sülfat/alüminat oranı ($\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$) etkilemektedir [75, 78]. Şekildeki halkalar oluşum sırasındaki etringit miktarını göstermektedir. Etringit oluşumu AB oku doğrultusunda artmaktadır.



Şekil 2.6. Etringit oluşumuyla agrega çevresinde ve çimento hamurunda çatlak oluşumu [75]



Şekil 2.7. SO_3 ve Al_2O_3 oranına göre etringit (E) oluşumu (M=Monosülfat) [75]

2.4.2. Dış kaynaklı sülfat etkisi

Çeşitli dış kaynaklardan sertleşmiş betona penetre olan sülfat iyonunun çimento hidrasyon ürünleriyle kimyasal reaksiyona girmesi dış kaynaklı sülfat etkisi olarak tanımlanmaktadır. Bu reaksiyonlar betonda yeni bazı ürünler meydana getirir. Oluşan yeni ürünler betonda hacim artışı, kohezyon kaybı, kütle kaybı gibi oluşumlarla

birlikte çatlamaya da neden olabilmektedir [10, 83, 84]. Dış kaynaklı sülfat etkisi betonda kimyasal bozulma ile başlar. Bu muhtemel kimyasal bozulmalara fiziksel bozulma mekanizmaları da yardım eder. Bu mekanizmaların birlikte oluşması sonucunda beton yapı elemanlarının servis ömrü önemli derecede kısılır. En yaygın dış sülfat kaynakları aşağıda sıralanmıştır [10].

1. Yeraltı suları
2. Göl ve nehir suları
3. Endüstriyel atık suları
4. Kurak bölgelerdeki topraklarda mevcut alçıtaşı
5. Sülfat kaynağı bakımından zengin kil ve diğer toprak türleri
6. Tarım alanlarında kullanılan gübre sulara karışarak sülfat etkisine neden olabilir.

Endüstriyel atık sularındaki sülfat miktarı göl ve nehir sularında bulunandan genellikle daha fazladır. Özellikle fosil yakıt kullanan ve arıtma üniteleri bulunmayan enerji santrallerinin yer aldığı bölgelerdeki yağış suları da yüksek miktarda sülfürik asit içerebilir. Kurak bölgelerdeki topraklarda bulunan alçıtaşı ile sülfat bakımından zengin kil ve diğer toprak türlerinin bulunduğu bölgelerdeki sülfat, yağış sularının etkisiyle yeraltı ve yüzeysel sulara karışarak dış kaynaklı sülfat etkisine neden olabilmektedir [10].

Dış kaynaklı sülfat etkisi iki grupta incelenmektedir:

- (1) Yüksek C_3A ve görece düşük sülfat derişiminin neden olduğu etringit oluşumu,
- (2) Düşük C_3A ve yüksek sülfat derişiminin neden olduğu alçı oluşumu.

Her iki etki bir arada meydana gelebilir, birinden diğerine geçiş ani olmaz [66]. Araştırmalara göre etringit oluşumunun zararlı etkisinin genişlemeye, alçı oluşumunun zararlı etkisinin ise çimento hamurunda yumuşama ve kohezyon kaybına bağlı olduğu belirtilmektedir. Birçok araştırmacı kohezyondan kaynaklı kütle kaybı ve yumuşamanın sülfat iyonlarının C-S-H jeliyle doğrudan birleşmesinin

bir sebebi olduğunu belirtirken, Mehta söz konusu etkiyi hem CH hem de C-S-H jelinin bozulmasına bağlamaktadır [85, 86].

Sulardaki sülfat iyonları çoğunlukla alkalilerle ve kalsiyum katyonlarıyla birleşmiş halde bulunur. Yani sülfat iyonu doğada: Na_2SO_4 , K_2SO_4 , MgSO_4 ve CaSO_4 şeklindedir. Sülfürik asit (H_2SO_4) ve amonyum sülfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) sülfat atağına sebebiyet veren sülfat iyonu bulunduran diğer kaynaklardır. Bu değişik türdeki sülfat kaynaklarında meydana gelen reaksiyonlar farklılıklar göstermektedir. Sülfat iyonunun bağlı olduğu iyonla göre çimento hidrasyon ürünleriyle meydana gelen reaksiyon ürünleri de farklılıklar gösterir [37].

Dış ortamda bulunan sülfat, çimento hidrasyon ürünleriyle kimyasal reaksiyona girerek ortam şartlarına göre alçıtaşı, etringit veya tomasit oluşturmaktadır. Bu üç ürünün de betonda meydana getirdiği ortak etki hacim artışıdır [74]. Oluşan bu ürünler sabit kalmayarak sürekli değişimler gösterirler. Sonradan oluşan alçıtaşı, etringit ve tomasit oluşumuna neden olacak şekilde reaksiyonlara girer ve betonda tekrar bir hacim artışına sebep olur. Böylece betonda çatlak oluşumu ve sonrasında parçalanma meydana gelebilir. Ancak reaksiyon ürünlerinin oluşmasındaki daha önemli etki dayanım kaybı ile çimentoda oluşan adezyon kuvvet kaybıdır. Çimento hamurunun bağlayıcı özelliğini sağlayan C-S-H jelinden kalsiyumun ayrılması adezyon kuvvet kaybına sebep olmaktadır [74]. Sülfat etkisi sonucu ilk olarak betonun yüzeye yakın kısımlarında özellikle çatlak ve boşluklarda alçıtaşı oluşur [84]. Tomasit oluşumu ile çok ciddi mukavemet ve adezyon kuvvet kaybı gerçekleşir [87]. Ayrıca C-S-H jellerinde önemli bozulmalara ve betonun yumuşamasına sebep olur. Nemli ortam ve düşük sıcaklıklarda buna daha çok rastlanır. Sıcaklık arttıkça tomasit oluşumu yavaşlar [88].

Eğer SO_4^{2-} iyonu etkisiyle ortamdaki Al^{3+} iyonu tükenirse ve halen ortamda SO_4^{2-} iyonu mevcutsa etringitten çok alçıtaşı oluşur. Betonun yüzey kısmında SO_4^{2-} iyonları alüminat iyonlarından fazla olduğu için alçıtaşı beton yüzeyine daha yakın yerde oluşur. Alkali iyonlarla birleşen sülfat iyonlarının betondaki kapiler boşluk sistemi vasıtasıyla başka yerlere hareketi sağlanır. Bu durum boşluk çözeltisindeki

alkali derişimini ve pH değerini artırır. Bu uygun olmayan şartlar altında betonda alkali-silika reaksiyonları da oluşabilir [10].

Sodyum sülfat (Na_2SO_4) etkisi

Ortamda sülfat iyonu bitmemiş ancak betondaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tükenmişse, reaksiyonların sürmesi için gereken Ca^{2+} iyonu C-S-H jelinden sağlanmaya başlar. C-S-H'dan Ca^{2+} iyonlarının ayrılması işlemine “*dekalsifikasyon*” denir. C-S-H yapısındaki CaO/SiO_2 oranındaki azalma betonun zamanla bağlayıcılık özelliğinin kaybolmasına sebep olmaktadır. C-S-H'dan mevcut tüm Ca^{2+} iyonlarının ayrılması çok yüksek derişimli Na_2SO_4 çözeltilerinde gerçekleşebilir [10].

PÇ ve alkali sülfatlarla üretilen betonun karşılıklı etkileşimiyle gözeneklerde oluşan etringit boşlukları doldurduğu için geçici bir dayanım artışı olmaktadır. Ancak etringitin kristalleşmesi sürdükçe oluşan iç basınç betonda hacim artışına ve sonrasında çatlamaya neden olmaktadır. Düşük Al_2O_3 ve yüksek sülfat içeren çimentolarla üretilen betonlarda oluşan alçıtaşı da etringit oluşumu kadar hacim artışına sebep olabilmektedir [10].

Na_2SO_4 etkisinde betonda sodyum miktarının yüksek olması durumunda $4\text{CaO}.0,9\text{Al}_2\text{O}_3.1,1\text{SO}_3.0,5\text{Na}_2\text{O}.16\text{H}_2\text{O}$ olarak tanımlanan, U-oluşumu diye adlandırılan bileşikler de oluşabilir. U-oluşumu monosülfatlara sodyum eklenmesiyle oluşur. Bu olay, yüksek miktarda Na_2SO_4 bulunduran suyun betona sızması, diğer taraftan betonun karşı yüzeyinden suyun buharlaşması sonucunda sodyumun birikmesi veya beton üretimi sırasında karışıma yüksek oranda sodyum içeren suyun katılması durumunda meydana gelmektedir. Bu olaya yüksek sıcaklıklarda daha çok rastlanmaktadır. U-oluşumunun aşırı miktarda olması durumunda hasara sebep olmakta ve uygun şartlar altında etringite dönüşebilmektedir [10].

Tenardit'in Mirabilit'e dönüşümü sırasında katı hacimde $\sim\%315,4$ oranında artış oluşur. Sıcaklık değişirse yukarıdaki dönüşüm reaksiyonu tersine dönebilmektedir.

Reaksiyondaki tekrarlanma dönüşümleri betonda yıkıcı etkiyi artırır [10]. Betondaki çiçeklenmeler Mirabilit'in Tenardit'e dönüşmesi sonucunda olmaktadır [37].

Alkali-sülfat etkisi çimentonun bileşimine göre değişebilmektedir. SRC üretmek için Al_2O_3 miktarı sınırlanmıştır. Al_2O_3 miktarını sınırlamak için, çimento bileşimindeki C_3A miktarı belli bir değerin altına çekilmektedir. C_3A miktarı azaltılan çimentonun hidratasyonu sırasında daha az monosülfat oluşacağı için alkali sülfat etkisinde etringit ve alçıtaşı oluşumu azalacaktır [10, 89]. Fakat C_3A miktarı azaltılmış çimentolarla üretilen betonların Na_2SO_4 gibi alkali sülfatlara karşı dayanıklı olmasına rağmen $MgSO_4$ ve H_2SO_4 bulunan ortamlar beton için zararlı olabilir. Sülfat atağı sırasında düşük pH değeri doğrudan C-S-H jelini etkilemektedir [21].

Sülfat etkisine karşı betonun dayanıklılığını artırmak için SRC kullanımının yanı sıra betonun geçirimliliğinin de düşük olması gerekir. Betonun sülfat dayanıklılığını artıran birinci faktör geçirimliliktir [88]. Geçirimliliği etkileyen en önemli faktörlerden biri s/ç oranıdır. Düşük s/ç oranının geçirimliliği azalttığı bilinmektedir. Geçirimliliği fazla olan betonlara dış ortamdan sülfat girişi kolay olduğundan sülfat etkisi, geçirimliliği düşük betonlara göre daha fazladır [90]. Ayrıca betonun hidratasyon sürecinin başlangıcında açığa çıkan $Ca(OH)_2$ miktarı da betonun sülfatlara karşı direncini etkilemektedir [88]. Yüksek C_3S/C_2S oranına sahip çimentolarla üretilen betonlarda, hidratasyonun ilk zamanlarında açığa çıkan $Ca(OH)_2$ miktarı fazladır. Betondaki $Ca(OH)_2$ miktarı arttıkça dış ortamdan gelen sülfat iyonları ile meydana gelen reaksiyonlar sonucunda alçıtaşı oluşumu artar. Alçıtaşı devam eden süreçte etringit oluşumuna neden olur. Betonun bünyesinde sonradan oluşan fazla miktardaki bu ürünler genişterek betonun çatlamasına sebep olur. Böylece dışarıdan yapıya madde girişi artar. Bununla beraber $Ca(OH)_2$ miktarı fazla olan beton Na_2SO_4 atağından daha fazla etkilenir. C_3S 'in hidratasyonu C_2S 'in hidratasyonundan 2,2 kat fazla $Ca(OH)_2$ açığa çıkarmaktadır. Sülfata dayanıklı iki tür çimento ile üretilen betonlarda, yüksek C_3S/C_2S oranına sahip çimento ile üretilenin sülfat etkisine karşı performansının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [88].

Sülfat çözeltisinin derişimi oluşan reaksiyon ürünlerinin miktarını da değiştirmektedir. Düşük derişimdeki Na_2SO_4 atağında ($<1000 \text{ ppm SO}_4^{2-}$) ilk oluşan ürün etringittir. Derişim arttıkça ($>8000 \text{ ppm SO}_4^{2-}$) oluşan ana ürün alçıtaşı, orta derişim değerlerinde ise ($1000\text{--}8000 \text{ ppm SO}_4^{2-}$) etringit ve alçıtaşının her ikisine birden rastlanmaktadır [21]. Bununla beraber Na_2SO_4 çözeltisinin derişimi arttıkça betonda bozulmalar artmaktadır [88, 91, 92].

Magnezyum sülfat (MgSO_4) etkisi

Betona giren MgSO_4 ilk olarak $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ve alçıtaşı oluşturur. Bu reaksiyon sonucu oluşan, suda çözünürlüğü az olan bir ürün olan brusit betondaki boşlukları doldurarak geçirimsizliğin azalmasına sebep olur. MgSO_4 atağına maruz betonda yüzeyde ve yüzeye yakın kısımlarda alçıtaşı oluşur [93].

Betondaki C-S-H jelinde dekalsifikasyonun başlaması C-S-H jellerini, amorf hidrit silikaya ($\text{SiO}_2\cdot\text{aq}$) veya zayıf kristal yapıya sahip magnezyum silika hidrata ($\text{M}_3\text{S}_2\text{H}_2$) ya da her iki ürüne birden dönüştürür ve reaksiyon sonucunda ilave alçıtaşı, brusit ve M-S-H oluşur. Reaksiyonlar sonucunda C-S-H jelinin C/S oranında azalma olur. C/S oranı reaksiyonun ilk aşamalarında betonun iç kısımlarında yüksek, dış kısımlarında ise düşüktür. MgSO_4 etkisi sürekli olarak devam ederse C-S-H'daki Ca^{2+} iyonlarının Mg^{2+} iyonlarıyla tamamı yer değiştirerek yapıdaki C/S oranı sıfıra düşer [10].

MgSO_4 'ın betona etkisinde C-S-H'n bozulması diğer sülfat etkilerinden daha hızlı olur. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 'in normal sıcaklıktaki çözünürlüğü yalnızca $0,01 \text{ g/l}$ 'dir. Bu durum doğgun çözeltinin pH değerinin 10,5 değerinde sabit kalmasını sağlar. Bu seviyedeki pH değeri C-S-H'n stabilitesini sürdürmesi için çok düşüktür. Serbest $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in tamamının tükenmesinden sonra ortamın pH değerini dengelemek için C-S-H $\text{Ca}(\text{OH})_2$ üretmeye başlar. Bu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ortamda MgSO_4 olduğu sürece üretilmeye devam eder. Böylece betonun C-S-H yapısı M-S-H, brusit ve alçıtaşına dönüşür. MgSO_4 etkisi ile pH'n çok düşmesi durumunda kalsiyum alüminat sülfat ($\text{CA}\bar{\text{S}}$) kısımlarında bozulma olur. $\text{CA}\bar{\text{S}}$ 'deki Ca^{2+} ve SO_4^{2-} iyonları yapıdan ayrılır. MgSO_4 betona etkisi ile OH^- iyonları yüzey kısımlara hareket ederek çözünmeyen brusit

oluşturur. Bununla beraber sülfat iyonları betonun iç kısımlarına hareket ederek alçıtaşı ve az miktarda da etringit oluşturur. Betonun dış yüzeyinde brusit ve bunun hemen altında alçıtaşı tabakası olmak üzere iki tabaka meydana gelir [10].

Biczok (1967) $MgSO_4$ derişiminin, oluşan ürünlerin miktarını etkilediğini belirlemiştir. Düşük $MgSO_4$ derişiminde (<4000 ppm SO_4^{2-}) daha çok etringit meydana gelirken, orta $MgSO_4$ derişiminde ($4000 - 7500$ ppm SO_4^{2-}) etringit ve alçıtaşı birlikte oluşmaktadır. Yüksek derişimde (>7500 ppm SO_4^{2-}) betonda hasar oluşumunun arttığı görülmektedir [21].

Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat etkisinin karşılaştırılması

$MgSO_4$ ve Na_2SO_4 etkisinde betonda ortak oluşan ürünler alçıtaşı, etringit ve tomasittir. Bu üç ürünün de betondaki bozucu etkisi: (1) Hacim artışıyla çatlak oluşumu, (2) Beton yüzeyinde pullanma (3) Adezyon kuvvet kaybıdır [10, 74]. Na_2SO_4 etkisine maruz betonda reaksiyon sonucunda NaOH oluşmaktadır. Oluşan NaOH hidrate olmuş çimentonun pH değerini yükselterek $\sim 13,5$ değerine ulaşmasına sebep olur. pH değerinin yükselmesi C-S-H'nin ve etringitin kararlılığını sağlar. Böylece oluşan NaOH bozulmaları önleyici etki yapar [92].

$MgSO_4$ atağında betonda (1) Brusit, (2) Hidrate silika (SiO_2) ve (3) Magnezyum silika jeli oluşmaktadır. Betonun yüzeyine yakın bölgede oluşan brusitin birikmesi ve bu maddenin çözünürlüğünün az olması sebebiyle geçirimsizlik azalır. Böylece betonun sülfat etkisine karşı direnci artar [10, 92]. $MgSO_4$ etkisine maruz betonda Mg^{2+} iyonu ile Ca^{2+} iyonu kolayca yer değiştirerek betondaki C-S-H yapısını M-S-H yapısına dönüştürebilmektedir. Oluşan M-S-H betonun adezyonunu azalttığı için $MgSO_4$ etkisinin Na_2SO_4 etkisinden daha etkili olduğu belirtilmektedir [10].

Brown ve Hooton (2002), iki farklı s/ç oranına sahip normal PÇ ve sülfata dayanıklı PÇ ile hazırlanan numuneleri yaklaşık 21 yıl Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ çözeltilerinde beklettikten sonra SEM ile incelemiştir [94]. Oluşan ürünler spektral analizle belirlenmiştir. Çalışmada Na_2SO_4 çözeltilisine maruz betonda yıpratıcı etkinin daha

fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum $MgSO_4$ etkisinde oluşan brusitin betonun geçirgenliğinde yapmış olduğu azalma ile açıklanmıştır. Bazı araştırmacılar $MgSO_4$ 'ın Na_2SO_4 etkisine göre daha bozucu olduğunu belirtmektedirler [72, 95].

SiO_2 ve CO_2 varlığında sülfat etkisi

PÇ ile üretilen sülfat etkisine maruz betonlarda ortamda yeterli miktarda sülfat ve karbonat iyonunun olması durumunda tomasit oluşabilir. Düşük sıcaklıklarda ve $pH=10,5$ seviyelerinde tomasit oluşumu daha fazladır [10, 96, 97]. Tomasit oluşumunda asıl etken dış kaynaklı sülfatlardır. Betonda karbonat içerikli agrega kullanımı ve iç kaynaklı sülfat etkisiyle de tomasit oluşabilir [10]. Sülfatlı yeraltı sularına maruz toprağa gömülü betonlarda sıkça tomasite rastlanmaktadır.

Çizelge 2.4. Betonda hasar oluşumunu etkileyen faktörler [98]

Etkiyi çoğaltan faktörler	Etkiyi azaltan faktörler
1. Yüksek porozite - Yüksek su emme kapasitesi - Geçirimsizlik - Boşluklar	1. Yoğun beton - Uygun karışım oranları - Su miktarının azaltılması - Bağlayıcı madde miktarının artırılması - Hava sürüklenmesi - Uygun sıkıştırma - Uygun bakım
2. Çatlaklar - Gerilme yoğunlaşmaları - Isıl şoklar	2. Çekme gerilmelerinin azaltılması - Donatı kullanımı - Puzolan kullanımı (ısı artışını azaltmak için) - Uygun derz yapımı
3. Süzülme ve sıvı penetrasyonu - Akan sular - Göllenme - Hidrolik basınç	3. Yapısal tasarım - Temas yüzeylerinin ve türbülansın azaltılması - Penetrasyonu önleyici membranlar ve koruyucu bariyer sistemleri oluşturulması

ACI Dayanıklı Beton Rehberine göre hasar oluşmuş betonda sülfat atağını düşündürebilecek iki mekanizma bulunmaktadır. (1) Alçı (2) Etringit oluşumudur. Her iki reaksiyon ürününün malzeme içindeki katı hacmin artmasına sebep olduğu ve böylece betonu parçaladığı düşünülür. Bazı kaynaklarda sülfat saldırısı, alçı ve sülfaloüminat korozyonu olarak tanımlamaktadır. Bu kapsamda ACI 201.2R-08'de betonda hasar oluşumunu etkileyen faktörler Çizelge 2.4'te, sülfat etkisine maruz

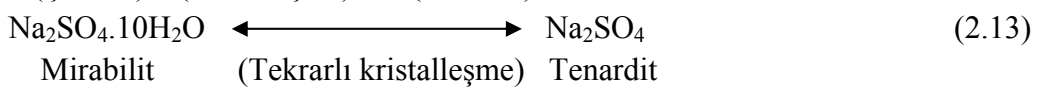
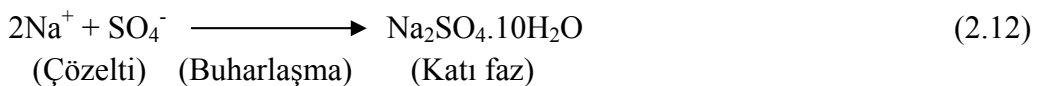
betonların servis ömürlerini uzatabilmek için öneriler Çizelge 2.5'te gösterilmiştir. Buna göre $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, Na_2SO_4 , MgSO_4 ve CaSO_4 etkisinin orta derecede olduğu belirtilmiştir [98].

Çizelge 2.5. Sülfat etkisine maruz betonlar için öneriler [98]

Etki	Suda eriyebilen SO_4 miktarı (%)	Sudaki SO_4 miktarı (ppm)	Çimento	S/Ç oranı (en yüksek)
Az	0,00 – 0,10	0 – 150	-	-
Orta	0,10 – 0,20	150 – 1500	Tip II, IP (MS), IS (MS)	0,30
Yüksek	0,20 – 2,00	1500 – 10000	Tip I	0,45
Çok yüksek	>2,00	>10000	Tip V + Pozolan veya GYFC	0,45

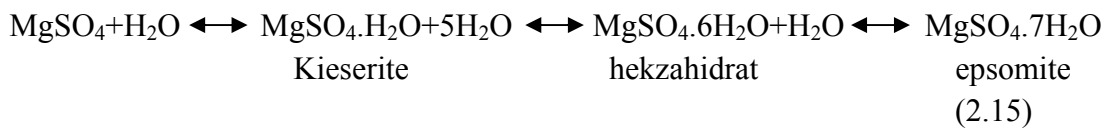
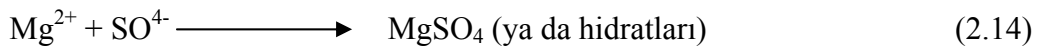
2.5. Sülfat Saldırıları Sırasında Gerçekleşen Kimyasal Olaylar

MgSO_4 saldırısında $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve/veya C-S-H'nin bozulması ile farklı formlar oluşabilmektedir. Sülfürik asit, sülfat kaynaklı agregalar ve hatta sülfat indirgeyici bakteriler tarafından bazı diğer reaksiyonlar da hasar oluşturabilir [10]. Sülfatça zengin bir bölgede ıslanma-kuruma etkilerine maruz kalan beton, hidrasyon ve buharlaşma ile sülfat tuzlarının tekrarlı kristalizasyon etkileri sonucunda genişir ve çatlar. Bu durum kimyasal reaksiyonlarla oluşsa bile sıklıkla “fiziksel saldırı” olarak tanımlanır [24]. Fiziksel bir olay olarak görünen sülfat saldırısı, çoğunlukla sülfat tuzunun kristalizasyonu ya da tuzun hidrasyonu sınırlaması olarak adlandırılmıştır. “Eş. 2.12”de sodyum sülfat dekahidratın ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) çözelti içinde oluşumu; bu oluşumun sonrasında tekrarlı çözülme ve kristalleşme eğilimleri ise “Eş. 2.13”te verilmiştir. Sıcaklığa bağlı bu süreç tekrarlı hacim artışları oluşturur. Eğer bu süreç beton matriksi içinde olursa çimento hamurunda kohezyon kaybıyla birlikte yorulma çatlaklarını meydana getirir [10].



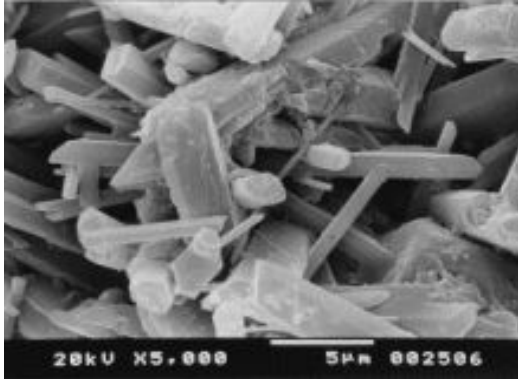
Reading (1982), sülfatın fiziksel saldırı mekanizmasının en az kimyasal etki mekanizması kadar önemli olduğunu belirtmiştir. Bir araştırmada betonu eğilme deneyine tabi tutarak yarıdan iki parçaya böldükten sonra, iki parça betonu kırılan kısımlarından %10'luk Na_2SO_4 çözeltisine numunelerin bir kısmı açıkta kalacak şekilde batırmıştır. Çözeltiye daldırılan kısımda çok az bozulma gözlenmiştir. Ancak numunenin üst kısımlarında çözeltiye daldırılmamış olmasına rağmen çok ağır hasar oluşmuştur. Bu sonuçlara göre hasar, betonun kapiler boşluklarından sıvı transferi sebebiyle sülfat çözeltisi betonun kuru bölgelerinde en yüksek seviyeye çıkar. Islanma-kuruma çevriminde çözelti suyunun buharlaşması sebebiyle betonun yüzeyindeki tuz derişimi yükselir ve böylece yüzeye yakın bölgelerde fiziksel hasar artar. Eğer Na_2SO_4 etkisi söz konusu ise kuruma etkisi tuzlaşmayı artırarak hasar oluşumunu yükseltir. Ancak bazı sülfatlar kristal şekle sahip değildir [25].

Hime ve Mather (1999), MgSO_4 'ın hasar oluşturma davranışını Na_2SO_4 'a benzetmiştir. “Eş. 2.14” ve “Eş. 2.15”de tekrarlı kristalleşme eğilimi verilmiştir. Fakat epsomit'in dehidratasyonu yalnızca 70°C 'in üstünde gerçekleşir. Reaksiyon döngüsü her koşulda oluşmaz. Hidratasyon sırasındaki genleşme “Eş. 2.15” sonucunda oluşur [22]:

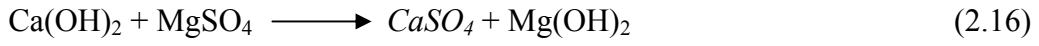


2.5.1. Alçı oluşumu

Suda çözülmüş halde bulunan MgSO_4 ve Na_2SO_4 betonun kapiler boşluklarından ilerleyerek makro boşluklara dolar. Makro boşluklar içinde doygun çözelti halinde bulunan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile “Eş. 2.16–19”de gösterilen reaksiyonlar sonucunda Resim 2.1’de gösterilen [99] alçı (CaSO_4) açığa çıkar [1, 7, 11, 66].

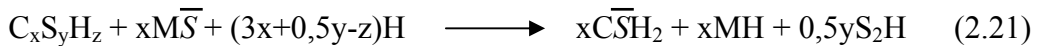


Resim 2.1. Alçı kristallerinin SEM ve optik mikroskopta görüntüleri [99]



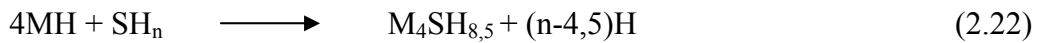
Na_2SO_4 'lı reaksiyonlar sonucunda katı fazın hacmi %124 oranında artar [67]. “Eş. 2.17–19” reaksiyonların ürünü olarak açığa çıkan CaSO_4 bileşiği iki mol su bağlayarak kristal haline gelir ve hacimce ~%15 genişler [6]. Reaksiyonların sonunda çözeltideki OH^- iyonu artışıyla pH artar ve bazik bir ortam oluşur.

“Eş. 2.16” reaksiyonu sonucunda oluşan Mg(OH)_2 ürününün çözünürlüğü çok az olduğundan boşluklar içinde çökeler ve boşluk çözeltisinin pH'ını azaltır. Bu durum C-S-H jeli için istikrarlı olmayan bir ortam oluşturur. Mg^{2+} ve Ca^{2+} iyonlarının eşit değerlikte ve iyonik yarıçaplarının birbirine yakın olması nedeniyle suda çözülmüş halde bulunan MgSO_4 klinkerin hidrate bileşiklerinden C-S-H ile reaksiyona girer [100]. Reaksiyon sonucunda C-S-H ayrışır (Bkz. Eş. 2.20 ve Eş. 2.21) [4, 6, 67].



“Eş. 2.20” ve “Eş. 2.21” sonucunda oluşan eriyiğin pH'ı 10,5 civarındadır. Sistemin istikrarlı olması için ortamın pH değerinin artması gerekir. Bunun için C-S-H jelinin

bir miktar CH'ı serbest bırakması gerekir. Ancak ortamda $MgSO_4$ bulunması sebebiyle çevrim “Eş. 2.16” ve “Eş. 2.18”den başlayarak kendini tekrar eder ve böylece zararlı etki sürer [66]. Bu reaksiyon sonucunda $CaSO_4$ 'ın üst üste kristalleşmesi ile hacim genleşmesi oluşur. Aynı zamanda C-S-H bağları ayrıştığı için dayanım düşer [6, 67]. Bu reaksiyonların sonucunda açığa çıkan $Mg(OH)_2$ ve $SiO_2.H_2O$ bileşikleri kendi aralarında reaksiyona girerek (Mg^{2+} , Ca^{2+} yerine geçerek) bağlayıcı karakterde olmayan bir reaksiyon ürünü (C-M-S-H ya da M-S-H) meydana getirir [66, 71]. Bu iyon yer değişimi dayanım ve adezyon kaybına sebep olur. Bu sebeple $MgSO_4$ saldırısı Na_2SO_4 saldırısından çok daha hasar vericidir [11, 18]. Ancak Hime ve Mather (1999) $MgSO_4$ saldırısında $Mg(OH)_2$ 'ın betonun yüzeylerine çökmesi sebebiyle gözeneklerin kapandığını, sülfat girişinin azaldığını ve sülfat saldırısı kaynaklı hasarın geciktirdiğini savunmuştur [22]. Ayrıca Bensted (2002), ana silikat fazı içerisindeki katı çözeltide Mg^{2+} iyonunun ve diğer iyonların bulunması durumunda termodinamik stabilitenin azaldığını, böylece bağlanma kapasitesinin arttığını belirtmiştir. Her iki çalışmaya göre $MgSO_4$ diğerine nazaran daha az etkili olabilir. “Eş. 2.22”de gösterildiği gibi C-S-H jelinin bağlayıcı olmayan M-S-H'a dönüşmesi yalnız $MgSO_4$ etkisiyle mümkündür. Na_2SO_4 etkisi denklem “Eş. 2.20 – 2.22” ile ifade edilen reaksiyonlara sebep olmaz [66, 71].

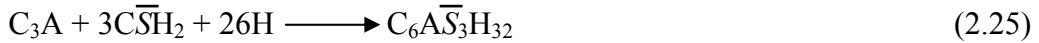
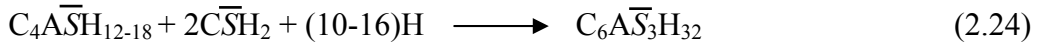
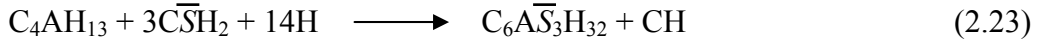


Sülfat hasarında alçının rolü tam olarak anlaşılabilmiş değildir [21, 66]. Alçı oluşumunun C-S-H, adezyon kuvvet ile dayanım kaybına sebep olması ve bunun sonucunda hasar oluşması yaygın bir görüş oluşturmıştır [66, 86]. Sülfat atağı sonucunda alçı oluşumunun, hidrate çimento hamur matriksini zayıflattığını ve sonrasında etringit oluşumuna sebep olarak daha büyük genleşmelere sebep olduğu belirtilmektedir [25].

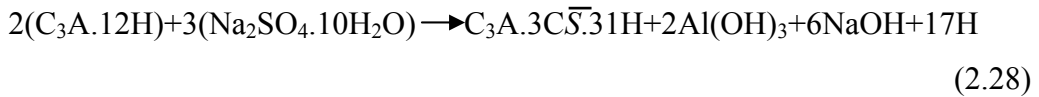
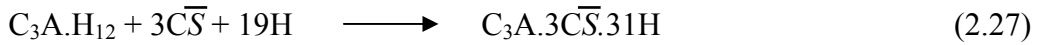
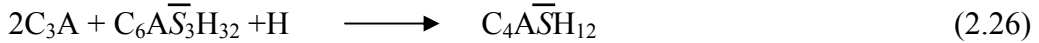
2.5.2. Etringit oluşumu

Yukarıda tanımlanan reaksiyonlardan oluşan alçı, kalsiyum alüminat hidrat (C_4AH_{13}), kalsiyum sülfoalüminat hidrat (mono sülfat $C_4A\bar{S}H_{12-18}$) veya hidrate

olmamış C_3A ile reaksiyona girerek trisülfat hidrat (etringit) oluşturur. Etringit oluşumunun meydana getirdiği genleşmeler hakkında değişik görüşler vardır. Ancak genel olarak genleşmenin kristalleşme basıncından kaynaklandığı bilinmektedir [24, 66]. “Eş. 2.23-25”te etringit oluşum reaksiyonları verilmiştir.



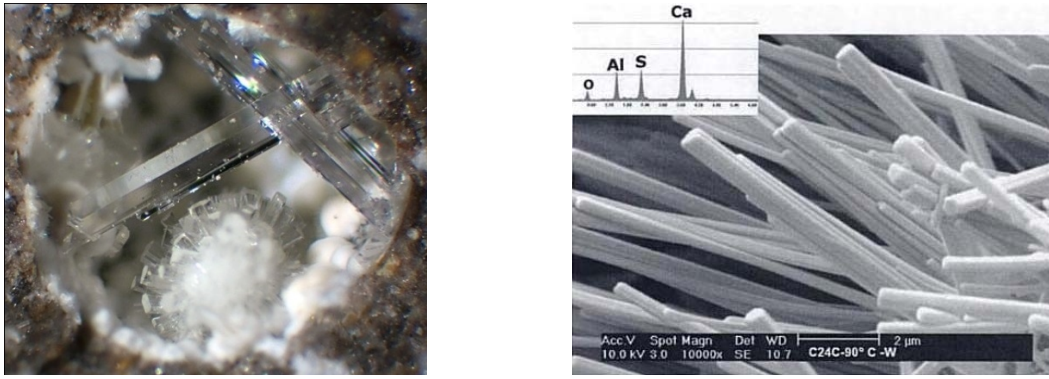
Etringit genleşmesi faydalı ve zararlı etkileri yönetmektedir [66]. Faydalı etki genleşen çimentoların geliştirilmesinde genleşme reaksiyonlarının kullanımını içerirken, zararlı etki ise sülfat saldırısı altında betonun genleşme hasarını içermektedir [25]. C_3A tamamıyla hidrate olmadan önce, ortamdaki tüm sülfat reaksiyona girerse oluşan etringit daha sonra monosülfoalüminat’a “Eş. 2.26” dönüşür. “Eş. 2.26–28”de verilen reaksiyon ürünlerinin oluşması sistemdeki alçı/ C_3A oranına bağlıdır [100].



“Eş. 2.27 ve 2.28”de gösterildiği gibi C_3A ile reaksiyona giren bileşikler 31 mol kristal suyu içeren trikalsiyumsülfoalüminat (candlot tuzu) oluşturur. Bu tuz bileşik halinde mukavim değildir ve beton içinde hacimce %227 oranında genleşir [6, 67].

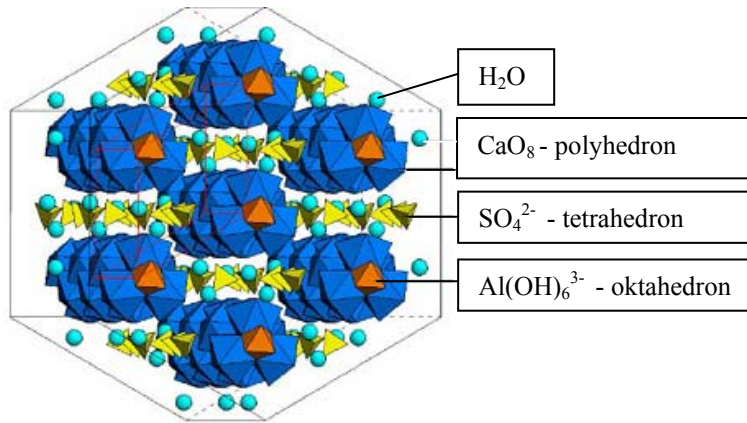
Etringit hekzagonal prizmatik kristaller biçiminde oluşur. Mehta etringit kristallerini ($C_6\overline{AS}_3H_{32}$) SEM ile incelemiştir. Bunların değişik tür ve boyutlarda küresel halde kümelenmiş veya birbirine paralel iğne şeklinde kristal yapılı olduğunu belirlemiştir. Ayrıca etringit kristallerini iki gruba ayırmıştır.

- Uzun düz şekilli 10–100 μm 'ye kadar uzunlukta ve kalınlığı çok küçük olan kristallerdir. Bunların düşük pH değerine sahip çözeltilerde geliştiği ve hacim artışına etkisi olmadığı belirtilmiştir.
- Çubuğa benzer şekle sahip, 1-2 μm uzunluğunda ve 0,1-0,2 μm kalınlığındaki etringit kristalleridir. Bunlar su emerek hacimce genişirler [72]. (Bkz. Resim 2.2)



Resim 2.2. Etringit kristallerinin optik mikroskop ve tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri [99, 101, 102]

Taylor'un etringit modelinde merkezde $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$ ve onun çevresinde CaO_8 bulunmaktadır. Burada Al^{3+} ve Ca^{2+} ile OH^- iyonlarını ortak kullanarak birbirine bağlanmaktadır. Kristallerin ara kanallarında SO_4^{2-} iyonu ve H_2O molekülleri vardır (Bkz. Şekil 2.8). Su molekülleri kristal yapı içinde sıcaklık değişimlerinden çabuk etkilenir. Bu yüzden etringit farklı su molekülü bulundurur [72].



Şekil 2.8. Etringit kristalinin yapısı [72]

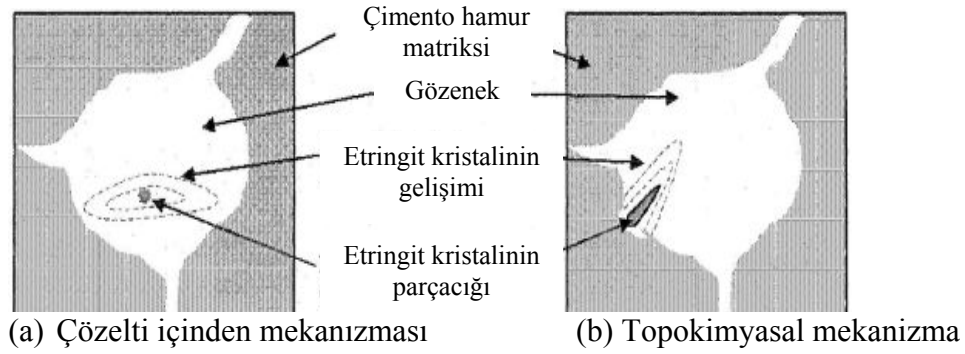
Etringitin oluşum ve genişleme mekanizmaları

Etringit oluşumu ve sonrasında genişmesiyle çimentoda oluşan çatlaklarla ilgili kesin bir fiziksel mekanizma geliştirilememiştir. Ancak bu konuda literatürde bir kaç hipotez yer almaktadır. Bu hipotezlerden bazıları aşağıda açıklanmıştır.

Çözelti içinde (koloidal) oluşum ve gelişim mekanizması

SO_4^{2-} iyonları, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve Al_2O_3 fazları gibi tüm bileşikler boşluk çözeltisinde iyonlar halinde bulunurlar. Bu bileşikler, çözeltide tutunanlardan fazla olduğunda, boşluk çözeltisinde farklı noktalarda etringit kristalleri tanecikler halinde oluşur ve gelişmeye başlar. Kimyasal reaksiyonlara katılan maddeler kimyasal oranlar dahilinde reaksiyonlara girerek etringit oluşumunun kontrolünü sağlarlar. XRD analizlerine dayanılarak şu yorum yapılabilir: Hidratasyonun genelinde alüminat fazları ile kirecin bulunması durumunda etringitin oluşumu gecikmeli olarak meydana gelir. Kireç tarafından geciktirilen hidratasyonun başlangıcından sonra $\text{C}_4\text{A}_3\overline{\text{S}}$ içeren çimento hamurunun hidratasyonu C_3A içerene göre daha üniform olur ve daha çok etringit üretir. Yani kirecin varlığında C_3A 'nın hidratasyonu $\text{C}_4\text{A}_3\overline{\text{S}}$ 'ye göre daha yavaş olmaktadır. Naik (2003)'ün araştırmasına göre: Mehta (1972) bu olayı şu şekilde teorize edilmiştir: $\text{C}_4\text{A}_3\overline{\text{S}}$ 'in olması durumunda portlandit $\text{C}_4\text{A}_3\overline{\text{S}}$ taneciklerini kaplar ve dengesiz hale getirir. Çünkü etringitin oluşması için gerçekleşen reaksiyonunun kimyasal oranlarından dolayı portlanditin çözülmesi gerekir. C_3A taneciklerini kaplayan kireç ise değişmeden kalır. Böylece C_3A etringite dönüşme aşamasında portlandite gerek duymaz. Kimyasal oranların aşırı olması durumunda hidratasyon sırasındaki etringitin morfolojisi ile ilgili olarak: kirecin yokluğunda etringit kristallerinin ortalama uzunlukları 5–10 μm , ortalama kalınlıkları ise 0,5 – 2 μm arasında kalmaktadır. Kirecin varlığında ise bir takım etringit kristali kısa çubuklar halinde ~1 μm uzunluk ve 0,25 μm kalınlığa sahip olmaktadır. Thorvaldson (1952) ve Mehta (1973) kirecin varlığında oluşan etringitin koloidal yapıda olup, uzun çita gibi olmayan ve büyük genişmelere sebep olan yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Koloidal etringit yüksek özgül yüzey alanına ve negatif yükle yüklenmiş olağan dışı bir kristal yapıya sahiptir. Çözelti arasındaki itme

kuvvetleri ve su moleküllerinin büyük miktarda adsorbsiyonu sebebiyle büyük genleşmelere sebep olacağı olasıdır. Etringitin hacmi boşluk hacmiyle eşitlendiğinde, bundan sonraki gelişimi ile boşluk duvarlarına aşırı gerilme uygular. Sonuçta betonun boşluk çerçevesine uyguladığı gerilmeler betonun çekmeye karşı dayanım limitini aşarsa, beton genişir ve kırılmalar meydana gelir (Bkz. Şekil 2.9a) [25].



Şekil 2.9. Sülfat saldırısına maruz sertleşmiş çimento hamur matriksindeki boşluğun şematik görünümü [25]

Topokimyasal reaksiyonlar ve yönlü kristal büyümesi

Topokimyasal reaksiyon, katı fazların yüzeyinde oluşan reaksiyon ürününün katı-sıvı ara yüzeyine dik olarak büyüdüğü bir katı hal hidratasyon mekanizmasıdır [66]. Boşluk çözeltisinde bulunan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve sülfat iyonları boşluklardaki katı kısımda (çimento duvarlarında) alüminat fazları ile reaksiyona girer. Etringit kristalleri katı boşluk duvarlarında tanecik olarak başladıkları gelişimi ince çubuklar oluşturarak sonuçlandırır. Bu çubuksu yapılar boşluk duvarlarına çarptıklarında aşırı gerilme uygular. Eğer bu gerilmeler gözenek çevresinin çekme dayanımından daha büyük olursa genleşmeler kırılmayla sonuçlanır (Bkz. Şekil 2.9b) [25].

Etringit kaynaklı genleşmeler, etringit kristallerinin topokimyasal gelişimiyle, koloidal etringitin su emmesiyle ya da her ikisinin boşluk duvarlarına artan basınç uygulaması sonucunda oluşabilir. Koloidal tanecikler moleküllerden daha büyüktür. Ancak mikroskopla doğrudan gözlenenlerden daha küçüktür. Bunların geometrisi ve boyutları elektron mikroskopuyla belirlenebilir. Çözülen maddelerin (portlandit gibi)

parçacıkları moleküler boyutta olup, koloidal parçacıklardan daha küçüktür. Süspansiyon gibi iri taneli karışımlardaki parçacıklar asılı parçacıklardan çok daha büyüktür. Karışımlardaki parçacıklar arasındaki ölçünün sınırları belirgin olmamasına rağmen, koloidal ya da çözeltideki koloidal parçacıklar genellikle 10^{-7} - 10^{-5} cm arasındadır [25].

Rasheeduzaffar (1992) fazla miktarda bulunan kirecin varlığında gelişen etringit mekanizmasını topokimyasal reaksiyonlar olarak nitelendirmiştir. Hidrate kalsiyum alüminatlardan Ca^{+2} çözülmesi fazla miktarda kireç bulunması sebebiyle engellenir. Bunun sonucunda hidrate kalsiyum alüminatların içinden reaksiyon ürünlerinin difüzyonu ile topokimyasal etringit gelişir. Bu mekanizma sonucunda oluşan etringit büyük genleşmelere sebep olur [103].

Bir kısım araştırmacı hidrate olmuş çimento hamurlarında genleşen $C_4A_3\bar{S}$ tanecikleri çevresinde radyal şekilde etringit kristallerini gözlemlemiştir. Ancak Mehta'ya göre, C_3A ve $C_4A_3\bar{S}$ in kristal yapılarının etringitin kristal yapısından tümüyle farklı olduğunu ve etringit kristallerinin çimento hamuru içinde rasgele dağılmış olduğunu savunmaktadır. Öte yandan, beton plastik haldeyken veya yeterince rijit olduğunda yönlü etringit kristali oluşumunun genleşmeye neden olmadığı bilinmektedir [86].

Pink ve Beaudoin (1992), etringit kaynaklı genleşme mekanizmalarını Şişme teorisi ve Kristal gelişim teorisi adlarıyla özetlemiştir. Genleşme, kristallerin oluşumu ile bağlantılıdır, örneğin etringit ve alçı oluşumunun her ikisi de yaygın teorilerdir. Aralarındaki temel farklılıklar ise şunlardır [104]:

- a. Kimyasal reaksiyon mekanizması: Şişme teorisi çözelti içinden etringit oluşum mekanizmasını desteklemektedir. Oysa kristal gelişim teorisi oluşumun bir topokimyasal durum olduğu savunulmaktadır.
- b. Genleşme mekanizması: Kristal gelişim teorisi genleşmeyi kristallerin anizotropik gelişimine dayandırırken; şişme teorisi, koloidal etringitin su absorbe ederek şişmesi ile genleşme oluşacağını varsaymaktadır.

Su absorpsiyonu sonucu şişme

Bazı durumlarda sülfata maruz çimentolu sistemlerde oluşan genleşmelerin, etringit kristali oluşumu ve büyümesinden çok, etringitin su emmesi sonucunda meydana geldiği belirtilmiştir [86]. Bu mekanizmanın koşulları sırasıyla şunlardır:

- Etringit oluşumunun gerçekleşmesi için sistemde yeterli sülfat, hidroksil ve kalsiyum iyonları bulunmalıdır.
- Birbirine “*Van der Waals*” kuvvetleriyle bağlı olan etringit kristallerince suyun adsorbe edilmesi için betonun nemli bir ortamda ve geçirimli yapıda olması gerekir.
- Etringit kristallerinin şişmesiyle genleşme oluşabilmesi için sistemin elastisite modülünün düşük olması gerekir. Ayrıca, hidroksil (OH^-) iyonlarının sülfat veya diğer bazı asidik iyonlarla yer değiştirmesi sonucunda C-S-H bozulmasıyla adezyon kuvvet ve rijitlik kaybı söz konusu olabilir. Bu koşullar altında alçı oluşumuna seyrek olarak rastlanılmıştır. Ancak, genleşme sebebi değildir.

Mehta'ya göre alçı oluşumu ve C-S-H jelinin sülfat adsorpsiyonu sonucunda çimento hamurundaki rijitliğin azalması, etringit genleşmesi tarafından takip edilir [86]. Ancak, yalnızca kötü kristalleşmiş etringitin su emme sonucunda şişme özelliği bulunmaktadır. Ortamdaki OH^- iyon derişiminin azalması ve SO_4^{2-} iyon derişiminin artması, çimento hamurunun rijitliğini azaltırken etringitin su emme kapasitesini artırır [25].

Diğer genleşme oluşumlarıyla ilgili araştırmalar

Tokay ve Dilek'in (2004) araştırmasında: Hansen'in belirttiğine göre Thorvaldson ve arkadaşları [66], bir kısım C_3S ve beş kısım kum ile bir kısım C_2S ve beş kısım kum kullanarak harç çubuk numuneleri hazırlamıştır. Numuneler su, %2 ve %8'lik Na_2SO_4 çözeltilerinde bekletilmiştir. Sülfata maruz numuneler suda bekletilenlerden daha fazla uzamamıştır. 1:5 C_2S harcı %2'lik Na_2SO_4 çözeltilisine 22 yıl bırakıldıktan

sonra %0,01'den daha az uzamıştır. %8'lik Na_2SO_4 çözeltisinde, harç 3 yıl sonra yavaşça uzamaya başlamış ve 22 yıl bekletildikten sonra %0,9 uzamıştır. Bu uzama kuvars kumundaki yavaş alkali-silika uzamasına bağlanmıştır.

Tokyay ve Dilek'in (2004) araştırmasında: Hansen (1963, 1966) sülfata maruz betonda jips oluşumunu incelemiştir. Hansen'e göre, eğer jips oluşumu genişletirici bir olay ise, genişlemenin kaynağı jips oluşumunda CH'nin sülfat iyonlarıyla reaksiyonu sırasındaki hacim artışı nedeniyledir. Hansen, kapiler boşlukta direk çözelti mekanizmalarıyla elde edilen jipsin, boşluk artı reaksiyonda yer alan ve çözünen katı CH'nin hacminden daha fazla yer kapladığını düşünmüştür. Eğer kapiler boşlukta oluşan jips, reaksiyonda tüketilen katı CH'nin hacmine göre boşluk artıdan daha fazla yer kaplıyorsa, bu ancak jipsin CH parçacıkları yüzeyinde topokimyasal reaksiyon mekanizmasıyla ya da olduğu yerde oluşmasıyla mümkündür. Eğer bir kuvvet uygulanıyorsa, bu kristal genişmesi değil hidrolik baskı nedeniyledir [66].

Gallop ve Taylor (1992–1996) PÇ hamuruyla bir seri deney gerçekleştirmiştir. Mikro yapısal ve mikro analitik tekniklerin her ikisi de kullanılarak, bir dizi reaksiyonu takip eden iki etki bölgesinin oluştuğunu belirlemiştir. Numunelerin bir bölgesinde etringit, başka bir bölgesinde jips oluşmuştur. Mikro yapısal özellikler çatlamanın jips oluşum bölgesinde sınırlı kaldığını göstermiştir. Bu rapor, genişlemenin etringit oluşumunun ani ve doğrudan sonuç olduğu yönünde genel kabule karşı bir görüştür. Ayrıca, jips formunun genişmeden sorumlu olmadığı belirtilmiştir. Genişlemenin en iyi bilinen nedeni çimento jelinin su absorpsiyonu olduğu vurgulanmıştır [105–107].

Tian ve Cohen (2000) araştırmalarında, sülfat etkisi sırasında jips oluşumunun genişletici olduğunu göstermiştir. Gerçek mekanizma ne şekilde olursa olsun net değildir. Sonuçlara göre, sülfat etki mekanizması karmaşıktır ve PÇ betonunun genişleme ile çatlaması sadece etringit oluşumuna bağlanmamalıdır. Jips oluşumu sırasındaki çekme gerilmelerinin, genişleme ve devamındaki çatlama üzerinde önemli rolü olabilir. Büyük miktardaki genişlemenin sadece deneyin geç aşamalarında merkezde kütle etringit birikimleriyle olmakta olduğunu belirtmişlerdir [108].

Islak ve kuru çevrimler üzerinde yapılan çalışmalarda, betonun bir kısmının suya daldırılmasıyla oluşan yıpranmanın, numunenin tümünü daldırmayla oluşan yıpranmadan daha hızlı olduğu görülmüştür. Sülfata maruz betonlar buharlaştırmayla veya çözeltiye kısmi daldırma gibi kimyasal ve fiziksel işlemlerin her ikisi nedeniyle pullanmaya; kuru atmosfere maruz kalan alanlarda ise dökülmeye uğramaktadır. Bir çalışmada, sülfat çözeltilerinin etkileri iki farklı uygulama yapılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Numuneler sülfat çözeltisinde sürekli bekletilmiş ve ıslak-kuru çevrimler yapılarak sonuçlar arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuçlara göre, her iki deneyde numunelerin %0,5 uzamaya ulaşması için gereken zamanın, ıslak-kuru çevrimde bir yılın, sürekli bekletmenin sekiz yılına eşit olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda araştırmacılar sülfat etkisini önlemek için en uygun çözümün C_3A ve C_4AF üzerine sınırlayıcı limitler koymak olmadığı sonucuna varmışlardır [66].

Irassar ve arkadaşları (1996) bir arazi deneyinde yıl boyunca sülfatlı topraklara yarım-gömülmüş UK, doğal puzolan ve cüruf içeren beton numunelerin sülfata dayanıklılığını araştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre, %8,5 C_3A içerikli çimentoların kısmen mineral katkılar ile yer değiştirmesi ile betonların sülfata dayanıklılığı arttırılmıştır. Yüksek mineral katkı içerikli betonlar tuz kristalleşmesi nedeniyle toprak seviyesi üzerinde daha büyük yüzey dökülmesi göstermişlerdir. Betonun kapiler yapısının su ve tuz taşınmasında ana etken olarak verilmiştir. Beton yüzeyinde oluşan pullanma ve tuz kristalleşmesine bir açıklama olarak Na_2SO_4 etki mekanizmasının etringit ile jips oluşumu ve tuz kristalizasyonu olarak açıklanmıştır. Araştırmacılar bu reaksiyon ürünlerinin hepsinin genleşme, bozulma ve çatlamaya neden olan orijinal bileşiklerden daha fazla yer kapladığını belirtmiştir. Jips ve etringit oluşumunda sırasıyla hacim yaklaşık 1,2, 2,2 ve 2,5 kez artar. Ayrıca $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ 'ın kristalizasyonu orijinal hacmin yaklaşık 4 ya da 5 katı genleşmeye neden olur. Tuz kristalleşmesinin kanıtı, betonun yüzeyinde toprak seviyesinin üzerinde gözlenen beyaz bir maddedir. XRD diyagramlarından elde edilen bilgiye göre çiçeklenmenin sebebinin tenardit olduğu belirtilmiştir. Numunelerin merkezlerinde sülfat etkisinin işaretleri görülmemiştir. Dış atmosferik bölgedeki hasar yumuşama, pullanma nedeniyle yıpranma ve basınç dayanımıyla kendini

göstermemiştir. Elastik ve dinamik modüller, iç etki mekanizmasının ilerleyişini değerlendirmede en hassas parametreler olarak görülmektedir [109].

2.6. Sülfata Dayanıklılığı Etkileyen Faktörler

Sülfat çözeltisinin derişimi, katyon tipi, pH değeri, sıcaklığı, akış halinde ya da durgun olup olmaması gibi faktörler sülfat etkisinin hasar derecesini yöneten faktörlerdir. Malzemenin sülfata direnci ise çimento tipi başta olmak üzere, çimentonun kimyasal kompozisyonu, s/ç oranı, agrega tipi, miktarı ve gradasyonu gibi faktörlerin etkisindedir. Diğer bazı faktörler çimentoda ya da betonda kullanılan mineral ve/veya kimyasal katkıları, kür ve yapım işlemleri gibi sayılabilir.

Çimento bileşeni olan C_3A ile SO_4^{2-} iyonunun reaksiyona girebilmesi ve trikalsiyum sülfat oluşması bir dizi fizikokimyasal olaylar bütünüdür. Bunun için öncelikle sertleşmiş beton içindeki boşluklara penetre olan SO_4^{2-} iyonunun derişiminin en az %0,1–0,2 olması gereklidir. Sülfata maruz betonlarda oluşan fizikokimyasal olaylar betonun geçirimsizliğine bağlı olan uzun bir süreçte meydana gelir. Bu süreçte sırayla mukavemette zamanla düşüş gözlenir, betonun normal yeşil-gri rengi biraz açılır ve yüzey beyazlaşır. Sonrasında genleşmeler oluşur ve parçalanma görülür [1, 6]. Bu süreçteki hız aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

2.6.1. Çözelti ile ilgili faktörler

Sülfat iyonu derişimi

SO_4^{2-} iyon derişimi sülfat atağının hasar derecesini etkileyen birincil parametredir. Çözelti içindeki sülfat miktarı arttıkça korozyon hızı artmaktadır. Derişim kadar betonun içine girebilen sülfat miktarı da önemlidir. Bu sebeple sülfatlı akarsular durgun sulara göre daha koroziftir [1, 6, 28, 67].

Uluslararası çimento birliği (CEMBUREAU) SO_4^{2-} 'nin suda 600 mg/l, zeminde 6000 mg/kg değerleri arasında orta etki değeri için üst limitler olduğunu belirtmiştir.

Avrupa standartlarında sülfat etkisinin orta derece limitleri için SO_4^{2-} 'nin zeminde 500 - 3000 ppm arasında bulunması gerektiği belirtilmiştir [25]. (Bkz. Çizelge 2.6)

Çizelge 2.6. CEMBUREAU sülfat agresifliği limitleri [18]

Agresiflik	Suda SO_4^{2-} (ppm)	Zeminde SO_4^{2-} (%)	Çimento	S/Ç oranı, En çok
1. sınıf	<200	<0,2	-	0,55
2. sınıf	200–600	0,2–0,6	-	0,55 / 0,50
3. sınıf	600–3000	0,6–1,2	SDÇ	0,50
4. sınıf	3000–6000	>1,2	SDÇ	0,45
5. sınıf	>6000			0,45+koruma

Sülfat atağının mekanizması sülfat çözeltisindeki derişimin değışimiyle farklılaşmaktadır. SO_4^{2-} iyonu derişimi arttığında sülfat atağının ilk göstergesi öncelikle alçı oluşumudur. SO_4^{2-} iyon derişimi Na_2SO_4 çözeltisinde <1000 ppm ise etringit formu oluşmakta, 8000 ppm< ise alçı ana ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Na_2SO_4 çözeltisindeki SO_4^{2-} iyonları 1000 ppm – 8000 ppm arasında ise hem alçı hem etringit görülebilmektedir. MgSO_4 çözeltisinde SO_4^{2-} iyonları <4000 ppm ise etringit oluşurken, 4000 ppm – 7500 ppm arasında hem etringit hem alçı oluşmakta, yüksek derişimlerde yani 7500 ppm< ise magnezyum korozyonu baskın olabilmektedir [110]. MgSO_4 çözeltisindeki SO_4^{2-} iyonları ~6000 ppm olduğunda sülfat atağı alçı oluşumu ile gerçekleşmektedir [25].

Gonzalez ve Irassar (1997) yaptıkları çalışmada pratik olarak C_3A içermeyen PÇ'de etringit oluşumunun çok geç meydana geldiğini savunmuşlardır. Hidrate olmayan C_4AF fazı ve bunun hidratasyon ürünleri etringit oluşturmak için reaksiyona girerler. Alümina taşıyan fazlar ve sülfat iyonlarının varlığında C_4AF 'nin düşük reaktivitesi sebebiyle etringit oluşumu betonun geç yaşlarında gerçekleşmektedir [111].

Gollop ve Taylor (1995) zayıf derişimlere sahip çözeltilere göre %10 Na_2SO_4 çözeltisinde çok daha fazla miktarda etringit oluştuğunu belirlemişlerdir. Ancak genişlemenin derecesinin etringit miktarıyla doğrudan ilişkisi olmadığını da eklemişlerdir [107].

Türker ve arkadaşları (1997) araştırmalarında 1900, 13000 ve 52000 mg/l derişime sahip $MgSO_4$ çözeltilerinin etkilerini PÇ ve PÇ-SF harçlarında incelemişlerdir. Fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelendiği araştırma 300 gün sürdürölmüştür. İlk 28 günlük süreçte harcın bazı özelliklerinde artış gözlemlenirken sonraki süreçlerde özelliklerin negatif etkilendiği belirlenmiştir. Araştırmada derişimin artışı ile harcın erken yaşlarında hasarı hızlandırıcı etkisi olmadığı, hasar oluşma süreci fiziksel etkilerle başlayıp sonrasında fiziksel ve mekanik özelliklerdeki ani azalmalara sebep olduğu gözlemlenmiştir. Yalnızca 52000 mg/l derişime sahip çözeltide bekleyen numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinde negatif değişimlerin olduğu açıkça görölmüştür [95]. Aköz ve arkadaşları (1995), çalışmalarında 18000 – 72000 mg/l aralığında çeşitli derişimlere sahip Na_2SO_4 çözeltilerinin etkilerini PÇ ve PÇ-SF harçlarında incelemişlerdir. Fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelendiği araştırma 300 gün sürdürölmüştür. En düşük derişim olan 18000 mg/l sülfat derişiminde eğilme ve basınç mukavemetlerinde çok önemli değişiklikler görölmezken, hacim yoğunluğu, hacimsel su emme gibi fiziksel özelliklerde ani bir bozulma gözlemlenmiştir. Bu ani bozulma zamanı kritik zaman olarak adlandırılmıştır. 72000 mg/l derişiminde ise 90 – 180 gün yaşlarındaki basınç ve eğilme dayanımlarında keskin bir azalma olmuştur [112].

Betonda hasar oluşturabilecek mekanizma Na_2SO_4 derişimine bağlı olarak iki aşamada oluşmaktadır. (1) Düşük derişimlerde ($<0,12$ veya $SO_3 < 830$ mg/l) hasar oluşturan etki etringit oluşumuyla, (2) daha yüksek derişimlerde ise alçı oluşumuyla görölür [66]. $MgSO_4$ etkisinde ise, betonda hasar oluşturabilecek mekanizma üç aşamada gerçekteşmektedir. (1) $SO_3 < 3200$ mg/l olan düşük derişimlerde hasar oluşturan etki etringit oluşumuyla, (2) $MgSO_4$ derişiminin $0,48-0,75$ olduğu durumlarda hem etringit hem de alçı oluşumuyla, (3) daha yüksek derişimlerde ise C-S-H jelinin M-S-H'a dönüşmesiyle görölür. Son aşamada OH^- iyonlarının MH oluşturması sebebiyle etringit için yeterli miktarda bulunmaması sonucunda etringit oluşmaz [14, 66, 71]. Ayrıca yapılmış çalışmalardan özet olarak elde edilen verilere göre çözeltideki sülfat derişimi arttıkça hasar hızı artmaktadır. Bununla birlikte hasarın derecesi de artmaktadır. Yüksek derişimler alçı oluşumuna, düşük derişimler ise etringit oluşumlarına sebep olmaktadır [113].

Sülfat tuzunun cinsi

Santhanam ve arkadaşları (2002) Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinin etkilerini farklı tip çimentolar kullanılarak hazırladıkları harçların genleşmelerini ve mikro yapılarındaki değişimleri araştırmışlardır. Çalışmada farklı sülfat derişimlerinin ve farklı sıcaklıkların etkileri de incelenmiştir. Sonuçlara göre Na_2SO_4 etkisinin iki aşamalı olarak gerçekleştiği anlaşılmıştır. Birinci aşamada az miktarda bir genleşme olmakta buna karşılık, ikinci aşamada ani bir genleşme artışı olmaktadır. İkinci aşamanın başlangıcı, harcın iç kısımlarında kimyasal olarak henüz zarar görmemiş bölgede çatlak oluşumuyla gözlemlenmektedir. Bu noktadan sonra genleşme hemen hemen sabit bir hızda harç numune tamamen bozulana kadar ilerlemektedir. Öte yandan, MgSO_4 etkisinde genleşme sürekli artan bir hızla olmaktadır. Mikro yapısal analizler sonucunda, numuneler MgSO_4 eriyiğiyle temas ettikten hemen sonra yüzeyde bir brusit tabakası oluştuğu ve zararlı etkinin bu tabakaya sülfat iyonlarının difüzyonuyla olduğu saptanmıştır. Numunelerde nihai bozulma C-S-H jelinin dikalsifikasyonu ve M-S-H oluşumuyla gerçekleşmektedir. Araştırmada hava sürüklenmiş harçlarla normal harçlar arasında gerek toplam genleşme miktarı gerekse sülfat etkisinin birinci aşamasının süresi bakımından bir farklılık görülmemiş olmakla birlikte hava sürüklenmiş numunelerin gözle muayenesinde daha az zarar gözlenmiştir [114]. Sıcaklığın etkisi, Na_2SO_4 çözeltisinde tutulan numuneler için olumlu olmuş ve ilk aşamanın süresini uzatmıştır. Ancak, ikinci aşamada bozulma hızının sıcaklıktan bağımsız olduğu saptanmıştır. MgSO_4 çözeltisindeki numunelerde ise sıcaklık artışı ile genleşme arasında doğrudan bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Çözelti derişiminin artmasıyla genleşme hızının arttığı da saptanmıştır [66].

Na_2SO_4 , MgSO_4 , K_2SO_4 ve $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ tuzları suda kolay çözünür. Buna karşılık CaSO_4 suda az çözünür. Suda çözünmeyen sülfatlı bileşiklerin beton korozyonu üzerine etkisi yoktur. Birçok sülfat atağı CaSO_4 içermektedir. Ancak doygun çözelti oluşturabilmek için CaSO_4 'tan 0,2 g/l gerekirken Na_2SO_4 ve MgSO_4 'lardan 10–70 g/l kullanılabilir. Buna rağmen zeminlerde genelde sülfat derişimleri azdır. Ancak bu yaygın olarak doğru kabul edilemez [14]. İki sülfat tuzu (MgSO_4 ve Na_2SO_4) doğada en fazla miktarda bulunan ve en yüksek hasar mekanizmasına sahip sülfatlardır.

Clark ve Brown (1999) çalışmalarında C_3A /alçı karışımının hidratasyonu sırasında mevcut ortamda Na^+ iyonlarının olması durumunda saf sudakine göre etringit oluşumunun gecikmeli olarak gerçekleştiğini belirtmişlerdir. C_3A ile $MgSO_4$ arasındaki reaksiyonlar için benzer kimyasal oranlarda reaksiyonların arttığı belirtilmiştir. Yani mevcut çözeltide $MgSO_4$ C_3A 'nın reaksiyonlarını artırmaktadır [115]. Böylece Na^+ iyonlarının varlığı Ca^{2+} iyonlarının çözünürlüğünü bastırırken, Mg^{2+} iyonları Ca^{2+} iyonlarının çözülebilirliğini artırmaktadır. Na_2SO_4 atağı Na^+ iyonlarının varlığında $Ca(OH)_2$ 'in çözülebilirliğini baskılar (0,02 mol/l 25°de). Ancak $CaSO_4.2H_2O$ 'ın (0,01 mol/l 25°de) çözülebilirliğini artırmaktadır. $Ca(OH)_2$ 'in yıkanması baskılanırken, Na^+ iyonlarının varlığı sebebiyle hidratasyon ürünlerinin stabilitesi sağlanır, böylece faydalı bir etki oluşur. Ayrıca hidratasyon sırasında oluşan C-S-H sertleşmiş çimento hamurunda birincil dayanımın gelişmesini sağlar. Betonun çevresini saran çözeltideki Na^+ iyonlarının derişimi artmadığında portlanditin çözülmesi gerçekleşebilir. Ancak özellikle akışkan haldeki Na^+ iyonları içeren çözeltilerde portlanditin çözülmesi beklenebilir [18]. Akışkan haldeki sıvı boşluk çözeltisindeki pH değerini düşürür ve portlanditin çözülmesini artırır. $Mg(OH)_2$ Mg^{+2} iyonlarının düşük çözünürlüğünden dolayı (çözünürlük=0,0002 mol/l) boşluk çeperlerine ve betonun dış kabuğuna çöker. Sonuçta boşluk çözeltisindeki pH düşer ve böylece C-S-H parçalanmaya başlar. Ek olarak Mg^{+2} ile Ca^{+2} iyonları yer değiştirerek C-S-H yapısı C-M-S-H ya da M-S-H formuna dönüşür. Bu durum zamanla çimentoda kütle kaybı, adezyon ve mekanik mukavemetlerdeki azalmalara sebep olan bir sürece liderlik eder.

Xu ve arkadaşları (1998) araştırmalarında $MgSO_4$ atağı ile ilgili çözeltinin pH'ının azalmasına göre etringitin yavaş bir şekilde çözünerek alçı ve gipsit ($Al(OH)_3$) oluşturması ve böylece kısım kısım kolay bir şekilde hasar verdirici bir genişlemeye sebep olduğunu savunmuşlardır. Bu raporlar temel alınarak $MgSO_4$ atağının hasar verdirici olduğu kadar yumuşatıcı etkisi de dikkate alındığında $MgSO_4$ 'ın Na_2SO_4 'a göre daha çok hasar verdirici bir etkiye sahip olduğu söylenemez [18].

Al-Amoudi ve arkadaşları (1995) PÇ ve diğer çimento tiplerini kullanarak ürettikleri harç ve betonlar üzerinde $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 'ın etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada

genleşme, kütle kaybı ve mekanik mukavemet deneyleri gerçekleştirilmiştir. 12 ay sonunda Na_2SO_4 etkisi altında %39, MgSO_4 etkisi altında %62 dayanım kaybı elde edilirken, genleşme sonuçları tam ters bir görüntüyle Na_2SO_4 içinde %0,104 iken MgSO_4 içinde %0,046 olarak belirlenmiştir. SRPC ile hazırlanan numunelerde Na_2SO_4 etkisi altında %34, MgSO_4 etkisi altında %53 dayanım kaybı elde edilirken, genleşme sonuçları tam ters bir görüntüyle Na_2SO_4 içinde %0,113 iken MgSO_4 içinde %0,031 olarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen net sonuçlardan biri MgSO_4 etkisinde her tip çimento harcında Na_2SO_4 etkisine göre daha fazla hasar oluşmuştur. Ancak genleşme deney sonuçlarına göre Na_2SO_4 etkisi diğerine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir [92].

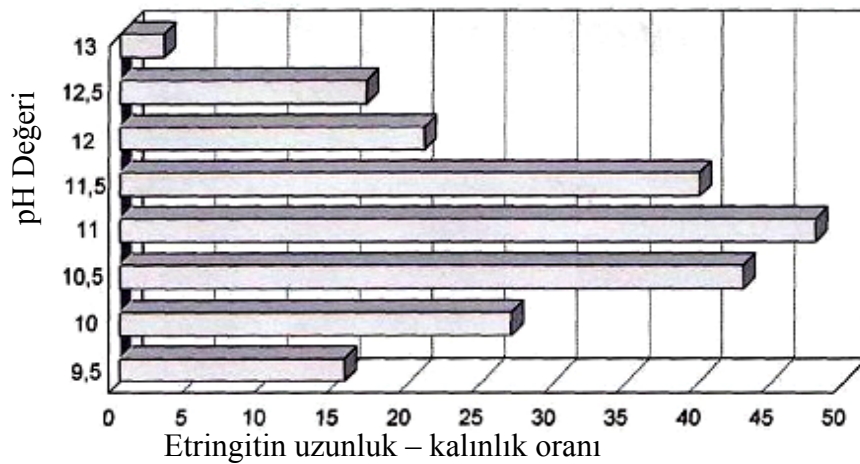
Hızlandırılmış sülfat etkisinin beton basınç dayanımına etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada 100 mm ayrıtlı küp numuneler %10 MgSO_4 çözeltisinde bekletilmişlerdir. ASTM Tip I çimento kullanılarak hazırlanan yüksek s/ç oranına sahip betonların 15 ay içinde %50 dayanım kaybına uğradıkları, buna karşılık ASTM Tip V çimento kullanılarak hazırlanan s/ç oranı düşük numunelerin bu süre içinde hiç dayanım düşüşü göstermediği saptanmıştır [66].

Çözelti pH'ının sülfat dayanıklılığı üzerindeki etkileri

Mehta ve Gjörv (1974, 1975) uygulanan çözeltinin pH'ı ve sülfat derişiminin H_2SO_4 titrasyonu ile istenen düzeyde tutulması yöntemini, daha sonra Brown (1981) tarafından daha geliştirilmiş ve sülfat eriyiğinin pH'ının dayanım ve genleşmeye olan etkilerini araştırmıştır. Çözeltinin pH değerinin 7 civarında olmasının sülfat etkisini önemli ölçüde hızlandırdığı belirlenmiştir [66]. Çözelti pH'ının azalmasıyla faz değişimleri şu şekilde gözlenmiştir: 12 – 12,5 pH'da CH ve C_4AH_3 bozulmakta, etringit çökelmekte; 10,6 – 11,6 pH'da alçı çökelmekte; 10,6 pH'da etringit bozularak gipsit ve alçı oluşturmakta; 8,8 pH'da C-S-H jeli bozularak silika jel oluşturmaktadır [116]. Bu modele göre, pH'ın 12,5'tan 9'a düşmesiyle Ca/Si oranı 2,12'den 0,5'e gerilemekte ve pH'ın 9'un altına inmesiyle C-S-H jeli amorf silikaya dönüşmektedir. Gözlemlere dayalı olarak, 10,5 – 10,7 pH değerlerinde kalsiyum sülfat hidratların, yaklaşık 11,6 pH değerinde ise monosülfat formunun

çökeldiği belirtilmiştir. Buna ek olarak 10'un altındaki pH değerlerinde de etringitin alçı, kalsiyum alüminatlar ve alümina jeline oranla daha kararsız olduğu 12,5'in üstündeki pH değerlerinde ise etringit liflerine rastlanmadığı belirtilmektedir [66].

Deng ve arkadaşlarına (1994) göre, düşük pH değerlerinde etringit büyük ve kalın, yüksek pH değerlerinde ise ince, iğnemsî kristaller şeklinde oluşmaktadır [117]. Bu bulgu Mehta'nın verileri ile [86] örtüşmektedir. pH değerleri çok yüksek olduğunda etringit kristalleri son derece incelmekte veya tamamıyla kaybolmaktadır [66]. Sülfata maruz betonlarda pH değişimine göre yapılan çalışmalarda etringit kristallerinin uzunluk ve kalınlık değişimi için Şekil 2.10'daki sonuçlara ulaşılmıştır [72].



Şekil 2.10. pH değerine göre etringit kristallerinin boy ve kalınlık oranları [72]

Khatri ve arkadaşları (1997) araştırmalarında genleşme ve dayanım kaybının esas nedenleri olarak pH 12 – 12,5 iken yalnızca etringit oluşumuyla genleşmeyi, pH 8 – 11,5 iken alçı oluşumunu ve C-S-H jeli bozulmasını işaret etmişlerdir [118]. Cao ve arkadaşları (1997) pH'ı kontrollü ve kontrolsüz (pH=3 ve pH=7) sülfat çözeltileri kullanarak farklı C₃A ve C₃S miktarlarındaki çimentoların davranışlarını incelemiştir. pH'ı kontrol edilmeyen çözeltilerde en az genleşmeyi hem C₃A hem de C₃S miktarı düşük çimentolarda, en fazla genleşmeyi ise hem C₃A hem de C₃S miktarı yüksek çimentolarda gözlemlemiştir. C₃A miktarı düşük, C₃S miktarı

yüksek çimentolar diğer ikisinin arasında kalmıştır. Öte yandan, pH kontrollü deneylerde, C_3A ve C_3S miktarları yüksek çimentolar en fazla genleşmiş, düşük C_3A içeren çimentolar, C_3S miktarlarından bağımsız olarak daha az genleşmişlerdir [119].

Sonuç olarak betonun gözeneklerinde oluşan çözeltinin pH değeri etringit boyutunu değiştirmektedir. Çözeltinin pH'ı 6'dan küçükse sülfat etkisi daha fazladır. Ayrıca çözeltinin pH değeri arttıkça sülfat etkisine bağlı genleşme azalmaktadır [19].

Çözelti sıcaklığının sülfata dayanıklılık üzerindeki etkileri

Sıcaklık tepkime hızlarını etkileyen bir faktördür. Bu sebeple sıcaklığın artmasıyla sülfat korozyonunda da artış görülür [6]. Ping and Beaudoin (1992) çözelti sıcaklığının dengelenmesinin genleşmeleri kontrol altına almak için önemli bir faktör olduğunu bununla birlikte sülfat kaynaklı genleşmelerin çözeltinin sıcaklığıyla orantılı olduğunu belirtmişlerdir [104, 120]. Çalışmalara göre Na_2SO_4 çözeltisinin sıcaklığı arttıkça sülfata maruz harç ya da betonların genleşmeleri azalmaktadır. Yani çözelti sıcaklığıyla genleşme arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır. $MgSO_4$ çözeltisinin sıcaklığındaki artışın etkileri literatürde çok açık belirtilmemiştir [121].

Santhanam ve arkadaşları (2002), 5, 21, 30 ve 38 °C çözelti sıcaklıklarında PÇ harçları üzerinde $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 etkilerini araştırmışlardır. Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ çözeltisinin sıcaklığı arttıkça genleşme hızı artmıştır. Ancak 5 – 21 ve 30 – 38 °C çözelti sıcaklıklarında genleşmelerde aşırı fark oluşmazken 5, 21 – 30, 38 °C çözelti sıcaklıklarında genleşmelerde aşırı fark oluşmuştur. Elde edilen verilerden genleşme ve derişim ile sıcaklık faktörleri arasında matematiksel modeller kurulmuş, regresyon grafikleri ve denklemleri elde edilmiştir [114]

Hekal ve arkadaşları (2002) $MgSO_4$ etkilerini oda sıcaklığı, 60 °C'de ve yine 60 °C sıcaklıkta ancak ıslanma-kuruma çevrimleri de yaparak araştırmışlardır. Sonuç olarak sıcaklığın artışı ile sülfat çözeltisinin etki hızı her tip harç numune için artış göstermiştir. Islanma-kuruma çevrimi yapılan harç numunelerde sıcaklığın etkisi

diğerlerine göre çok daha fazla gözlemlenmiştir. Sıcaklığın artışı bağıl basınç dayanımlarını da belirgin oranda azalmıştır [122].

Çözeltideki dış klor iyonlarının sülfata dayanıklılık üzerindeki etkileri

Tokyay ve Dilek (2004) araştırmalarında Kind'in çalışmasını özetlemişlerdir. Buna göre Cl^- varlığında sülfat direncinin artışı 1) Kalsiyum alüminat hidratların eriyebilirliğinin artmasına, 2) Gözenek sıvısında kireç derişiminin azalmasına 3) Alüminat hidrat fazlarının kloro-alüminatlara dönüşmesine bağlamıştır [66].

Biczok [110] ve Lea [71] Kind ve Batta'nın çalışmalarına dayanarak, deniz sularının sülfat etkisinin, klor iyonlarının varlığı nedeniyle daha az zararlı olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca, klorlu eriyiklerde etringitin çözünürlüğünün sudakine oranla üç kat daha fazla olduğu deneysel olarak saptanmıştır [66].

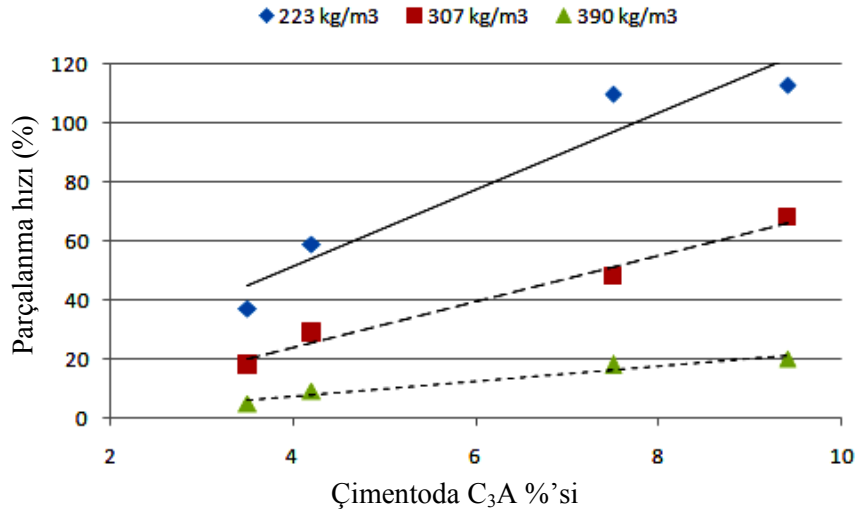
2.6.2. Çimento ile ilgili faktörler

C_3A içeriğinin sülfata dayanıklılık üzerindeki etkileri

Çimentodaki C_3A miktarı arttıkça sülfat etkisi o oranda şiddetlenecektir. Ancak sülfat etkisine maruz betonun parçalanma hızı direk betonun mekanik mukavemetlerine bağlıdır. Mukavemeti düşük olan betonda parçalanma hızı artar. Doğal olarak çimento dozajı düşük olan betonun sülfat direnci düşük olacaktır [1, 4, 6, 67]. Portland Çimentosu Birliği'nin (PCA) farklı çimentolar üzerinde yürüttüğü uzun süreli deneysel çalışmalar sonucunda betonun sülfat direncinin çimentonun kimyasal kompozisyonundan tahmin edilebilmesinin mümkün olduğu saptanmıştır. Araştırmada %7 C_3A miktarının olumlu ve olumsuz performanslarını ayıran bir çizgi olduğu belirlenmiştir. Ancak olumlu ve mükemmel performanslar arasındaki ayırımın yapılabilmesi açısından yeni çalışmalara gereksinim olduğu belirtilmiştir. %5 C_3A miktarının böyle bir sınır oluşturabileceği fikrini destekleyen sonuçlar, belirtilen değerin üstünde C_3A içeren ancak mükemmel performans gösteren çimentolar bulunduğundan genelleştirilememiştir [66].

Rasheeduzzafar (1992) çimentonun kimyasal kompozisyonunun betonun sülfat etkisi altındaki performansını önemli biçimde etkilediğini belirtmiştir. Gözenek sınırları üzerinde yapılan çalışma ve XRD analizleri sonucunda, C_3A gözeneklerdeki klorürlerin bir kısmını Friedel tuzu ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) oluşturarak ortadan kaldırmıştır. Bunun yanı sıra çimentoda %5'e kadar olan C_3A PÇ'nin priz süresini düzenlemek için eklenen %3 alçı tarafından tercihan tüketilir [103]. C_3A 'ya göre C_4AF 'nin hidratları sülfat çözeltisi içinde çok yavaş ve çok daha az ısı oluşturur [115]. Lea (1998), çimentoların sülfat direncini artırmak için C_3A yerine C_4AF ikame etmeyi önermiştir. Böylece düşük C_3A 'lı çimentolarda olduğu gibi sülfat dirençli çimentolar elde edilebileceğini düşünmüştür [71]. Pratik olarak C_3A içermeyen farklı C_3S içeriğine sahip çimentolarla yapılan bir araştırmada etringit oluşumunun ileriki yaşlarda meydana gelmesine C_4AF 'nin öncülük ettiği ve C_3S miktarı arttıkça daha yüksek genleşmelerin olduğu görülmüştür. Yazarlar bu durumun agrega-çimento ara yüzeyinde çökmüş büyük alçı tortusundan kaynaklandığını savunmuşlardır [111].

Çimento dozajı 313 kg/m^3 ve s/ç oranı 0,60 olan %3, %9 ve %13 C_3A oranına sahip betonlar ile 30 yıl süren çalışma sonucunda, 180 gün sülfat kürü yapılan numunelerin basınç dayanımı C_3A oranı düştükçe sülfat direncinin arttığı görülmüştür. 30 yıla kadar çeşitli süreçlerde yapılan dayanım testlerinde yine %3 C_3A oranına sahip çimentolu betonlarda sülfat direnci yüksek görülmüştür. %13 C_3A 'lı betonlarda 10 yıldan sonra dayanımında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada %13 C_3A içeren çimentolarla 313 kg/m^3 dozajlı 0,55, 0,60 ve 0,65 s/ç oranlarında 3 farklı grupta beton numuneler hazırlanmış ve 30 yıl sülfata maruz bırakılmıştır. 5 yıl süresince basınç dayanımı testlerinde çok büyük farklılıklar olmamıştır. Ancak s/ç=0,65 olan betonlar diğer iki gruba göre daha çabuk dayanım kaybetmiştir. s/ç oranı arttığında mikro ve makro boşluklar artacağı için geçirimsizlik artarak daha fazla $Ca(OH)_2$ birikecektir. $MgSO_4$ etkisinde kalmış beton boşluklarında daha fazla $CaSO_4$ oluşacak ve betonun parçalanma hızı ve miktarı artacaktır [6, 28, 67]. Şekil 2.11'de çimento dozajının etkisi altında kullanılan çimentoların C_3A miktarının sülfat etkisinde parçalanma hızına etkisi üzerine bir çalışmanın sonucu grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Dozaj-C₃A arasındaki ilişkinin parçalanma hızına etkisi [6]

Gollop ve Taylor (1994), ASTM V tip çimentoların ve bunların C₃A miktarlarının hidrate alüminat ve ferit fazlarının etringit ve monosülfat oluşturabildiğini ancak çok büyük miktarlarda oluşmadığını gözlemlemişlerdir [106].

C₃S/C₂S oranının sülfata dayanıklılık üzerindeki etkileri

Rasheeduzzafar (1992), sülfat etkisine maruz C₃S/C₂S oranı yüksek olan çimentoların alçı oluşumuyla yumuşama türü bir bozulmaya uğradıklarını belirlemiştir. Ayrıca C₃S/C₂S oranının yüksek oluşunun sülfat atağının etkisini artırdığını savunmuştur. Kimyasal oranlardaki hesaplamalara göre C₃S ürünleri C₂S'in aynı miktarına göre 2,2 kez daha fazla CH oluşturmaktadır. Kirecin fazla bulunması durumunda sülfat atağı daha agresif olur. Sonuç olarak kireç bakımından zengin çevrede hidrate kalsiyum alüminatların çözülmesi baskılanarak etringitin topokimyasal gelişimine kaynak sağlanır. Böylece büyük genleşmeler oluşur [103]. Irassar ve arkadaşları (2000) birisi düşük diğeri yüksek miktarda C₃S içeren iki ASTM Tip V ve doğal puzolan ile kalker tozu içeren katkılı çimentolar üzerinde sülfat etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada C₃S miktarı yüksek olan çimentonun kötü bir performans sergilediğini, puzolan kullanılarak sülfat direncinin arttığını ancak kalker tozunun olumsuz etki oluşturduğunu saptamışlardır [123].

Gonzales ve Irassar (1997) üçü hiç C_3A içermeyen biri %1 C_3A içeren ve C_3S miktarları %40 ile %74 arasında değişen dört çimento üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada C_3S miktarının artmasıyla sülfat etkisi nedeniyle meydana gelen genleşmelerin arttığını saptamışlardır. X-ışınları difraksiyonu analizleri sonucunda çimentolarda, sülfat eriyiğine batırıldıktan 90 gün sonra alçı oluşumu gözlenmiştir. Öte yandan, bir yıllık sürenin sonucunda etringit oluşumları saptanmıştır [111].

Çimento inceliğinin sülfata dayanıklılık üzerindeki etkileri

Çimento tane dağılımının sülfat etkisi nedeniyle oluşan genleşmeler üzerindeki etkileri ile ilgili yapılan bir araştırmada görelî irî taneli çimentoların genleşmelerde ve dolayısıyla erken yaşlardaki çatlamalarda azalma sağladığı belirlenmiştir [66].

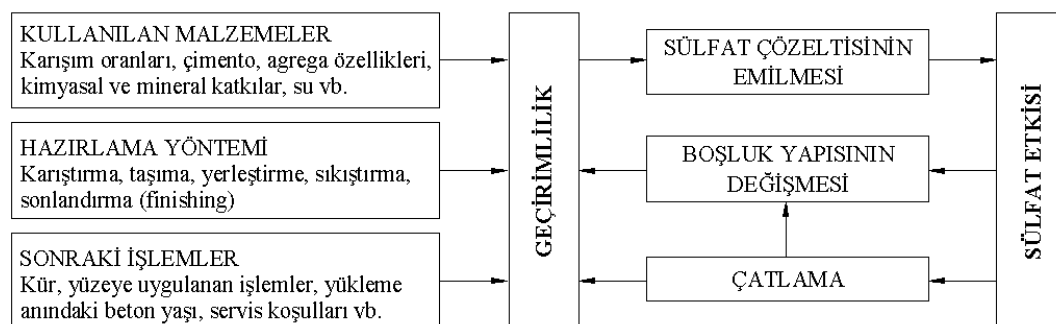
2.6.3. Betonun kalitesi ile ilgili faktörler

Porozite ve geçirimliliğin sülfata dayanıklılık üzerindeki etkileri

Geçirimsizlik betonun porozitesiyle ilişkili bir kavramdır. Boşluklu bir beton bünyesine yüksek miktarda sülfat depo edebilir. Bu nedenle geçirimsiz betonlarda sülfat etkisi sadece yüzeyde görülebilir. Geçirimli betonlarda ise özellikle betonun bir yüzü sülfat etkisine maruz bırakılmış, diğer yüzü atmosferik etkiye maruz kalmış ise sülfat korozyonu çok etkili olmaktadır. Betonda bulunan çatlaklar korozyonun bu bölgelerde yoğunlaşmasını sağlayarak etkide bulunurlar [1, 6, 28, 67].

Mehta (1983) sülfat direnciyle ilgili mevcut standart ve deney yöntemlerinin tartışılabilirliğini ve betonun geçirimliliğinin kontrolünün, çimentonun kimyasal özellik kontrolünden daha önemli olduğunu öne sürmektedir [86]. Hidratasyon sürecinde çimentolu sistemlerin gözenek yapısının oluşumu iki zıt mekanizmanın etkisi altında bulunmaktadır. Bir yandan C-S-H jeli oluşumuyla gözenek boyutları ve hacmi azalırken [34] diğer yandan genleşme nedeniyle porozitenin artması söz konusudur [1]. Ayrıca, gecikmiş genleşmeler mikro çatlaklara da neden olmaktadır. Uzun süreli genleşmeler söz konusu olduğunda, hidratasyon sonucunda oluşan C-S-

H jel miktarının bu genleşmelerin neden olduğu gözenekleri kapatmak için yeterli olamayacağı belirtilmektedir [66]. Öte yandan harç ve betonlar üzerinde yapılan bir araştırmada, harçların geçirimliliği kullanılan hidrolik bağlayıcının kimyasal kompozisyonundan daha az, betonlarda ise her iki faktörün de hemen hemen eşdeğer öneme sahip olduğu belirlenmiştir [118]. PÇ ile değişik miktarlarda UK içeren katkılı çimentolarla ve SDÇ'lerin gözenek yapıları ve geçirimlilikleri ile ilgili bir araştırmada, 1) Sülfat çözeltisine konmadan önce $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'e doygun suda bekletilen PÇ hamurlarının bekletme sürelerinin sülfat direnci açısından önemli bir fark oluşturmadığı, ancak UK'lü hamurda bekletme süresinin uzamasıyla performansın arttığı; 2) Sülfat etkisine karşı direncin yalnızca geçirimliliğin bir fonksiyonu olmadığı; 3) "Mürekkep Şişesi" şeklindeki gözeneklerin tüm numunelerde sülfat penetrasyonuna daha duyarlı olduğu; 4) PÇ hamurlarında sülfat etkisine duyarlı gözeneklerin boyutlarının sabit olduğu ve 5) Sülfat etkisinin; sülfat iyonlarının, geçirimlilikle ilişkili olarak, gözeneklere difüzyonu ve duyarlı minerallere ulaşabilmek için gözenek boyutlarıyla ilişkili iki mekanizma içerdiği sonuçlarına ulaşmıştır. Betonun sülfat direncinin artırılması Ca^{2+} ve SO_4^{2-} iyon miktarının ve geçirimliliğin azaltılmasıyla mümkün olabilir [66]. Şekil 2.12'de sülfat etkisi ile geçirimlilik arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Betonun sülfat dayanıklılığı ile geçirimliliği arasındaki ilişki [67]

Su/çimento oranının sülfata dayanaklılık üzerindeki etkileri

S/ç oranı sertleşmiş betonun boşluk yapısını ve geçirimliliğini etkileyen en önemli faktördür. Yüksek s/ç oranı yüksek geçirimliliğe sebep olurken SO_4^- içeren agresif

maddelere karşı düşük penetrasyon direnci oluşturur. ACI, Cembureau gibi kuruluşlarla uluslararası standartlar çimento kombinasyonun ve s/ç'nin uygun oranda kullanılması ile sülfata maruz betonların dirençlerinin artırabilirliği savunulmaktadır. ACI 201.2R-08 çimento tipi olarak ASTM Tip V çimento ve $\leq 0,45$ s/ç oranı kullanılmasıyla ağır sülfat atağına karşı konulabileceğini belirtmiştir [98].

Monteiro ve Kurtis (2003) s/ç ve C_3A içeriğinin hasar oluşturma zamanına etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak her iki değişkenin de artması durumunda hasar oluşma süresi kısalmıştır. Çimentoda en fazla %8 C_3A içeriği ile 0,45'ten daha az oranda s/ç kullanılması durumunda betonun performansı artmıştır [89].

Kılınç ve Uyan (2003) karışım suyuna giren $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltilerinin çimento harcının mekanik mukavemetlerine etkisini araştırmışlardır. Araştırmada %2-8 arasında değişen oranlarda $MgSO_4$ ve %0,5-3 arasında Na_2SO_4 çözeltileri ile 0,60 ve 0,75 s/ç oranına sahip PÇ 42,5 kullanılarak harç numuneler üretilmiştir. Çalışmanın sonucunda $MgSO_4$ 'ın zararlı etkisi %6< derişime sahip çözelti ile elde edilirken, Na_2SO_4 'ın zararlı etkisi %0,5< derişime sahip çözelti ile elde edilmiştir. Ayrıca Na_2SO_4 'ın $MgSO_4$ 'a oranla daha zararlı olduğu belirtilmiştir [124].

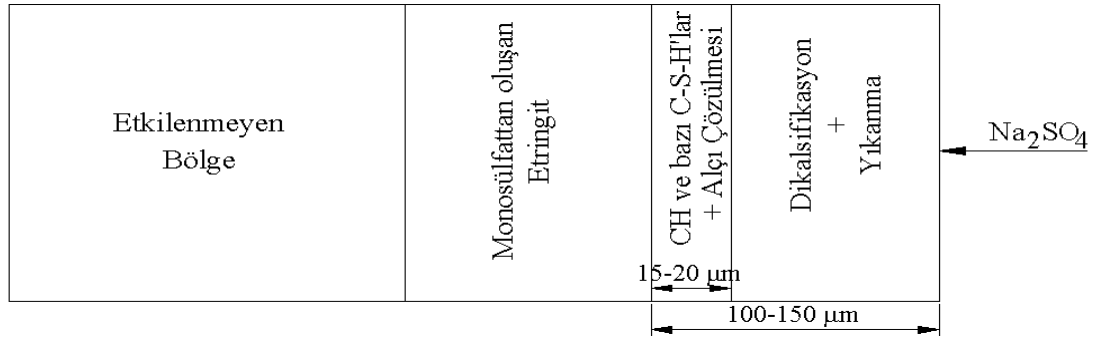
2.7. Sülfat Taşınımı ve Sonrasında Oluşan Hasarın Mekanizmaları

2.7.1. Gollop ve Taylor modeli (1992, 1994 ve 1995)

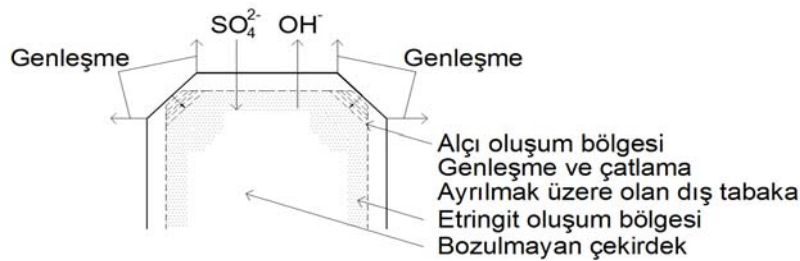
Yapılan çalışmada, Na_2SO_4 etkisindeki PÇ hamur örneklerinin kenarlarında başlayan kırılmalardan dolayı kütle kaybı oluşmuştur. Na_2SO_4 'ın etkisiyle kenarlardan 0,6 mm derinlikte C-S-H'nin çözündüğü gözlenmiştir. Aynı örneğin yüzey alanlarında daha fazla alçı oluşumuna rastlanılmıştır, bu sebeple yüzeye paralel çatlaklar belirlenmiştir (Bkz. Şekil 2.13-14) [105]. Burada $pH > 11,6$ olduğunda monosülfatlar, $pH > 10,7$ olduğunda etringit stabildir. $pH < 10,7$ olduğunda etringit alçıya dönüşür. Her iki çözeltide yüzey tabakası genişler ve altındaki malzemeden ayrılma eğilimine girer. Gollop ve Taylor'a göre iri yapılı alçı kristalleri genişlemenin birincil sebebi olamaz. Ancak zayıflamış malzemede genişleme gerilmelerine katkıda bulunabilir.

SRPC hamurlarında Na_2SO_4 'ın etkisi benzer davranışlar göstermiştir, ancak SRPC hamurlarında PÇ hamurlarına göre çatlak oluşumu ve kütle kaybı daha az görülmüştür. Bu mekanizma şematik olarak Şekil 2.15'te gösterilmiştir [107].

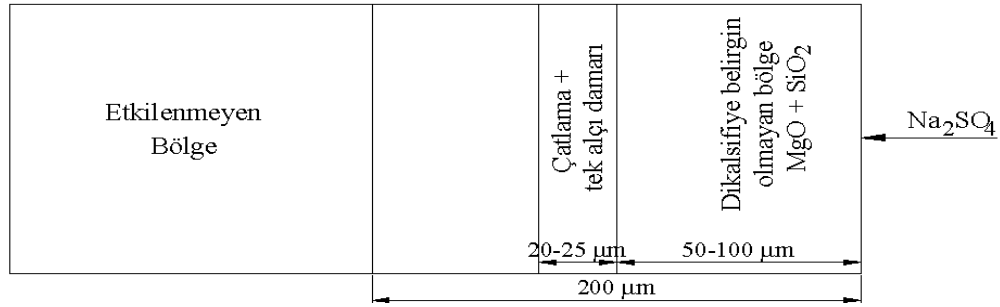
MgSO_4 etkisindeki PÇ hamurunun kenar kısımlarında çok daha hızlı hasar oluşur. Alçı damarının en dışında Mg^{2+} 'un penetrasyonu çok limitlidir. MgSO_4 etkisinde Na_2SO_4 'ın etkisine göre çok daha fazla çatlama ve dağılmalar görünür. Şekil 2.16-2.17'de MgSO_4 'ın etki mekanizması şematik olarak gösterilmiştir [107]. Sülfat etki derinliği karşılaştırıldığında Na_2SO_4 etkisindeki bölgenin kalınlığı MgSO_4 'inkinden daha büyüktür. Sülfatın girebildiği bu derinlik Na_2SO_4 etkisinde daha fazladır. Sebebi brusitin gözenek doldurma etkisinden olabilir [22].



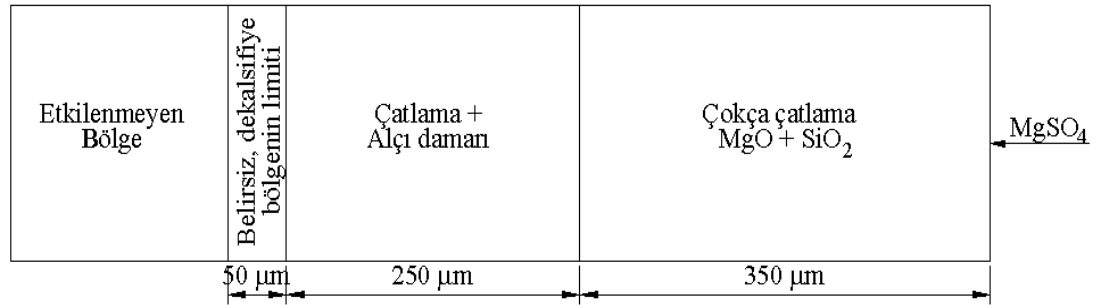
Şekil 2.13. Na_2SO_4 'a maruz PÇ hamurunun yüzeyinde oluşan kimyasal olay [105]



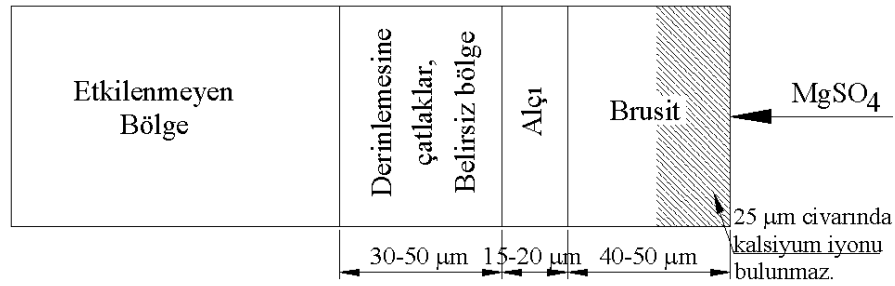
Şekil 2.14. Na_2SO_4 'a maruz PÇ hamurunun hasar mekanizması [107]



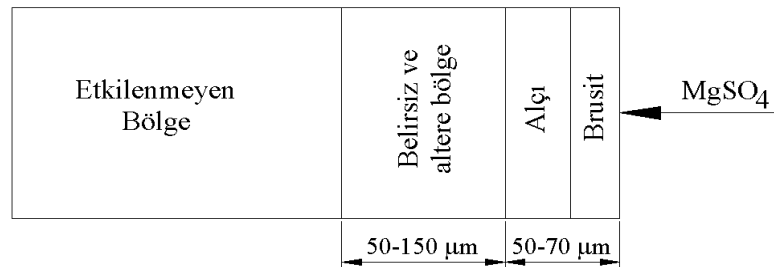
Şekil 2.15. Na_2SO_4 'a maruz SRPC hamurunun yüzeyinde oluşan kimyasal olay [107]



Şekil 2.16. MgSO_4 'a maruz PÇ hamurunun kenarında oluşan kimyasal olay [105]



Şekil 2.17. MgSO_4 'a maruz PÇ hamurunun yüzeyinde oluşan kimyasal olay [105]



Şekil 2.18. MgSO_4 'a maruz SRPC hamurunun yüzeyinde oluşan kimyasal olay [107]

MgSO₄ etkisindeki PÇ ile SRPC hamur örneklerinin sonuçları karşılaştırıldığında örneklerin yüzeyinde gözlenen brusit ve alçının birlikte kalınlıkları aynı gibi görünmektedir. PÇ örneklerinde brusit-alçı tabakası iç bölgesinde bazı çatlamlar gözlemlenmiştir. Fakat SRPC örneklerinde bu bölgelerde herhangi bir çatlak gözlenmemiştir. Bu durum sülfat etkisine maruz SRPC'nin PÇ'ye göre daha dirençli olduğunun bir göstergesidir (Bkz. Şekil 2.18) [107].

2.7.2. Haynes modeli (2002)

Modele göre, başlangıçta etringit önde şekillenir, onu yüzeyin yan tabakasında alçı oluşumu takip eder. Sülfat atağının üzerine pH<10,7 olduğunda etringit formu alçı, CaCO₃ ve Al(OH)₃'e ayrışır. Bu durum alçı oluşumu için kaynaktır [125].

2.7.3. Bonen ve Cohen modeli (1992–1, 1992–2)

Bonen ve Cohen PÇ ve PÇ-SD çimento hamurları üzerinde MgSO₄ etki mekanizmasını incelemişlerdir. Tüm örneklerde çekirdeğe göre dış bozulmuş tabakada çok az miktarda hidrate olmamış granüller gözlemlenmiştir. Sülfata maruz bırakılan bölgede, geçiş kuşağında Ca²⁺'nın azalması şunlarla açıklanmıştır:

- Geçiş kuşağındaki portlanditin harcanması alçı oluşturmak için
- Kalsiyumun yıkanması
- C-S-H'nin dikalsifikasyonu

Bonen ve Cohen'e göre (1992), MgSO₄ atağının mekanizmasını, birkaç bölüm içeren iki difüzyon süreci oluşturmaktadır. OH⁻ iyonları hamurdan dışarıya difüze olurken SO₄²⁻ iyonları da numune yüzeyinden derinlere difüze olur. Bu iki esas işlem C-S-H, Ca(OH)₂ ve alçı arasındaki Ca²⁺ iyonlarının yeniden dağılmasına eşlik eder. Mg²⁺ iyonları da çimento hamuruna difüze olur. Bunlar yüzey kenarında brusit gibi çöker ve 40–120 µm kalınlığında bir bantta görülür. Bu oluşum Mg²⁺ iyonlarının ileri zamanlardaki difüzyonunu engeller. SO₄²⁻ iyonları hamurun içine difüze olur ve

birtakım paralel iç alçı tabakası oluşturur. Alçının aşırı doygunluğunda alçı formunu oluşturan çekirdek parçalanır ve böylece ileri difüzyon kritik değere ulaşana kadar çekirdek olmayan bölgeler meydana gelir. Böylece iç alçı tabakalarının oluşumu için çok uzun zaman gerekir. Alçı bantlarının oluşum derinliği yüksek sülfat derişimlerinde örnekler için çok kısadır. Yüksek $MgSO_4$ derişiminin yüksek oranda brusit oluşumuna neden olduğu varsayılır [126, 127].

2.7.4. Santhanam ve arkadaşlarının modeli (2002–1, 2002–2, 2003)

Na_2SO_4 etkisinde genleşme oluşumu iki aşamada açıklanmıştır:

Aşama 1: Genleşme çok yavaş gerçekleşmektedir.

Aşama 2: Genleşmeler aniden artmakta ve örnek parçalanıncaya kadar dengeli durağan bir davranış sergilenmektedir [114, 128, 129].

$MgSO_4$ etkisinde artan oranlarda genleşme oluşur. Numunenin yüzeyinde brusit tabakasının oluşumuyla sonuçlanır, sülfat iyonlarının difüzyonu bu tabaka üzerinden gerçekleşir. Şekil 2.19’da Na_2SO_4 için oluşturulan model şematize edilmiştir. Buna göre altı aşamada gerçekleşen olay şu şekilde gerçekleşmektedir:

Aşama 1: Harç çubuklar $pH=6-8$ arasında olan Na_2SO_4 ’a maruz bırakılmıştır.

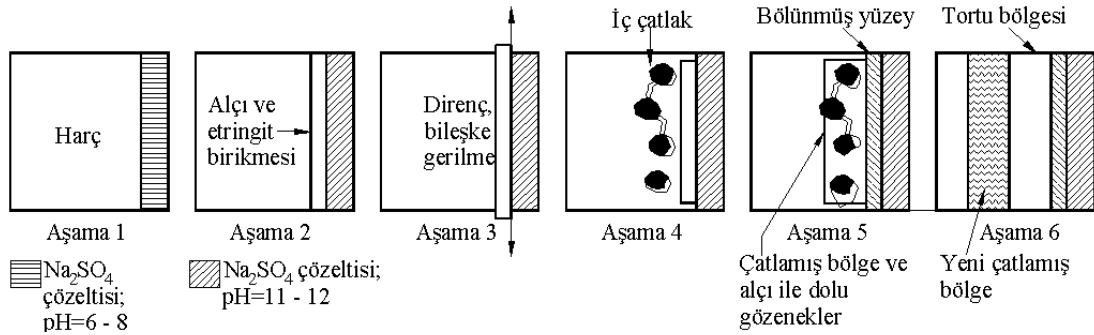
Aşama 2: dış çözeltide $pH=11-12$ ’ye yükselir ve o değerde kalır. Numunenin yüzeyinde yerini alan etringit ve alçı dış tabakada birikir (tortu oluşturur).

Aşama 3: dış tabaka genişlerken harcın içinde sülfattan etkilenmeyen çekirdekte çekme gerilmesi oluştururlar.

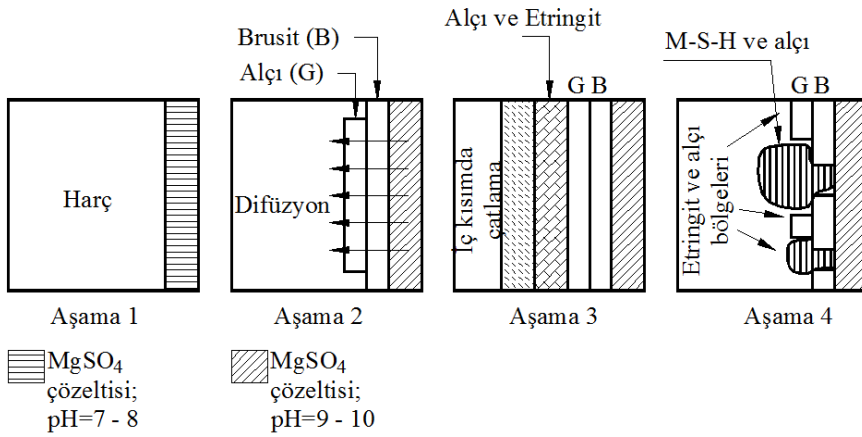
Aşama 4: çekme gerilemeleri sebebiyle sülfattan etkilenmeyen harcın çekirdek kısmında çatlamlar başlar.

Aşama 5: dış tabaka parçalanır.

Aşama 6: içteki çatlak tabaka tortulaşma bölgesi olur ve sülfatın girmedığı harcın çekirdek kısmında yeni iç çatlama bölgesi oluşur, o da hızlı bir şekilde tortu bölgesine dönüşür [128].



Şekil 2.19. Na₂SO₄ atağı için önerilen mekanizma [128]



Şekil 2.20. MgSO₄ atağı için önerilen mekanizma [128]

Şekil 2.20’de MgSO₄ atağının etki mekanizmasını dört aşamada şematik olarak açıklanmıştır. Buna göre; birinci aşamada harç çubuklar başlangıçta pH’ı 7–8 olan MgSO₄ etkisine maruz bırakılmıştır. İkinci aşamada dış çözeltinin pH değeri yükselerek 9–10 değerine çıkmış ve o değerinde sabitlenmiştir. Çözeltinin sabit sürecinde sülfat çözeltisinin difüzyonla bu tabakalara penetre olmasıyla birlikte, iç tabakada oluşan alçı tarafından takip edilen brusit dış katmanda birikir. Üçüncü aşamada yüzeye yakın bölgelerde etringit ve alçı oluşumu içteki etkilenmeyen kısımlarda genleşme gerilmelerine ve çatlakların oluşmasına öncülük ederler. Dördüncü aşamada dıştaki brusit ve alçı tabakalarındaki çatlamlar sebebiyle sülfat çözeltisinin malzemeye girişi hızlanır ve C-S-H’a direk saldıran Mg²⁺ iyonları C-S-H yapısını M-S-H formuna dönüştürür. Böylece en yüksek hasar oluşturan adezyon ve kütle kaybına sebep olur [128].

2.8. Sülfat Etkisini Belirlemek İçin Kullanılan Deney Yöntemleri

2.8.1. ASTM C452 ve ASTM C1012 ile genleşme miktarının belirlenmesi

Sülfat atağının betonda oluşturduğu genleşmeler ve harabiyeti belirlemek için iki hızlandırılmış standart metot bulunmaktadır. Bu metotlar Amerikan Standartları tarafından tanımlanmış olup ASTM C452 [130] ve ASTM C1012 [131]'dir. ASTM C452 ve ASTM C1012'de PÇ harç çubukları öncelikle su içinde belirli bir dayanım değerine ulaşıncaya kadar kür edildikten sonra sülfat çözeltisi içine konur. Sonrasında sülfat etkisine maruz harç çubuklarda oluşan genleşmeden kaynaklanan boy değişimleri ölçülür. İlk okumayla son okuma arasındaki farkın ilk boya bölümü boy değişimini diğer bir ifadeyle genleşmeyi ifade eder. ASTM C452 ile ASTM C1012 arasındaki en belirgin farklar, ASTM C452 yalnız PÇ ile hazırlanan harçlar üzerinde tatbik edilirken, ASTM C1012'de PÇ içine çeşitli mineral katkıları katılarak oluşturulan çimentolar üzerinde de sülfat etkileri gözlemlenmektedir. ASTM C1012'de 50000 ppm sülfat iyonu içeren çözelti hazırlanması tavsiye edilmiştir.

Naik (2003)'in araştırmasında: Buenfeld ve Hassanein (1996), betonun bozulması üzerinde yaptığı laboratuvar testlerinin bozulma mekanizmasını anlamak için faydalı olduğunu savunmuştur. Ancak bozulmanın oranını belirleme konusunda limitler vardır. Bu limitlerden bazıları şunlardır:

- Hızlandırılmış bozulma sülfat hasar mekanizmasını saptırabilir.
- Kısa süreleri aşan çalışmaları kapsayan laboratuvar testleri ile geç yaşlarda katkılı çimentoların gözenek yapısı gelişimi gibi uzun zamanlı davranışların belirlenmesi mümkün olamamaktadır.
- Alan çalışmalarını laboratuvara taşımak her zaman olası bir durum değildir, örneğin sıcaklık ya da nem dönüşümleri gibi faktörleri
- Sülfat atağını laboratuvarda hızlandırarak kullanılan yaygın strateji, çözelti derişimlerini veya sıcaklığı artırmak ya da konu olan numuneleri aralıklı ıslak ve kuru çevrimlere tabi tutmaktır. Ancak bu yaklaşımların her biri yalnızca

reaksiyon oranlarını etkilemekle kalmaz, aynı zamanda oluşan ürünler ve hasardan sorumlu mekanizmalarında etkilenmesine sebep olmaktadır [25].

Felekoğlu ve arkadaşları (2006), ASTM C 452 ve ASTM C 1012 standartlarını uygulayarak farklı 5 tipte çimentonun sülfat dirençleri üzerinde karşılaştırma yapmışlardır. SRC haricinde tüm çimentolar aynı klinkerden üretilmiştir. Umulduğu üzere ASTM C 452 standart deneyi karışımli çimentoların sülfat dirençlerinin belirlenmesinde yetersiz kalmıştır. ASTM C 1012, ASTM C 452'ye göre daha gerçekçi sonuçlar üretmiştir [132].

Yazıcı (2006), PÇ 42,5 kullanılarak hazırlanan, değişik oranlarda YFC içeren harçların Na_2SO_4 çözeltisinde farklı koşullarda yaptıkları genleşmeler ve basınç dayanımlarındaki değişimleri araştırmıştır. Numuneler ASTM C 1012'ye uygun şekilde hazırlanmış, bir grup 150 g/l Na_2SO_4 çözeltisinde 6 ay süre ile bekletilmiş, diğer grup ise aynı çözeltide ıslanma-kuruma etkisine tabi tutulmuştur. Ayrıca, buhar kürü geçirmiş (60 °C'de 9 saat) karışımlar için deney programı tekrarlanmış ve sonuçlar suda kür edilmiş kontrol karışımları ile kıyaslamalı olarak sunulmuştur. YFC kullanımı harçların sülfat dayanıklılığını olumlu yönde etkilemiştir [133].

Göktepe ve arkadaşları (2006), PÇ harçlarının Na_2SO_4 etkisiyle genleşme seviyelerini istatistiksel ve sinir ağları yöntemlerini kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışmada ASTM C1012'ye göre 27 adet harç hazırlanmış ve deneyleri yapılmıştır. 45 deneysel genleşme değeri istatistiksel olarak analiz edilmiş ve 17 lineer ve lineer olmayan regresyon modeli geliştirilmiştir. Ayrıca sinir ağları yöntemi lineer olmayan ilişkiyi tanımlayabilmek için kullanılmıştır. Sonuçta UK ve doğal puzolan içeren çimentoların sülfat etkisinde genleşmeleriyle ilgili olarak sinir ağları ile elde edilmiş model diğer regresyon modellerine göre çok iyi performans sergilemiştir [134].

Ramyar ve İnan (2007), üç tip PÇ'ye %10, 20, 30 ve %40 UK ve doğal puzolan ikame ederek hazırladıkları 24 çeşit çimento harcını %3 ve %5 Na_2SO_4 'a maruz bırakarak ASTM C1012'ye göre genleşme miktarlarını belirlemişlerdir. Sülfat

çözeltisinin pH değişimi için asit titrasyonu yapılmamıştır. Sonuçlar bir matematiksel formül ile değerlendirilmiş olup matematiksel formül sonucunda tahmin edilen değerlerle deney sonuçları karşılaştırılmıştır [135].

2.8.2. Fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi

Çimentolu sistemlerde sülfat atağının etkilerini anlayabilmek için kütle kaybı veya genleşme gibi deney yöntemlerini tek başına kullanmak yeterli değildir [21]. Bu sebeple sülfat etkilerini belirleyebilmek için fiziksel ve mekanik özelliklerin de belirlenmesi gereklidir. Fiziksel özelliklerin belirlenmesinde kapiler ve hacimsel su emme, kütle kaybı ölçüm yöntemleri ile mekanik özellikler için eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı yöntemleri kullanılmaktadır.

Türkmen (2003), Na_2SO_4 ve MgSO_4 'a maruz SD ve YFC ikameli PÇ harçlarını 400 güne kadar çeşitli süreçlerde kuru birim ağırlığını, basınç dayanımlarını, ultrasonik ses hızlarını (UPV), kapiler su emme katsayılarını ve görünür boşluk oranını su emme testi ile belirlemiştir. Sonuç olarak %10UK+%20YFC ve 0,35 s/ç oranına sahip çimentoların en yüksek basınç dayanımını ve UPV değerini ve en düşük kapiler su emme katsayısı ile görünür boşluk oranını verdiği tespit edilmiştir [136].

Mangat ve Khatip (1993), UK, SD ve öğütülmüş YFC'yi farklı yüzdelerde çimento yerine ikame ederek çimento hamuru hazırlamışlardır. Çalışmada s/ç oranı sabit tutulmuştur. Porozite ve boşluk yapısı cıva püskürtmeli porozimetre ile belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin karbonatlaşma miktarları için fenolftalein solüsyonu kullanılmıştır. Numuneler döküldükten sonraki ilk 14 gün için 20–45 °C sıcaklıkta %25, 55 ve 100 bağıl nemde kür edildikten sonra, sülfat çözeltisi içine daldırılmıştır. Sonuç olarak çimento ağırlığınca %22 ve %32 UK ikamesi en fazla sülfat direnci sağlamıştır. Ayrıca başlangıçta hava kürü yapılan numunelerin, su kürü yapılanlara göre sülfat direnci daha yüksek çıkmıştır. %80 öğütülmüş YFC ikameli numunelerde sülfat direnci artmıştır. %40 öğütülmüş YFC ikamesi ile yapılan karışımda daha az boşluk hacmi ve daha ince boşluk yapısı oluşmuştur. Böylece başlangıçta 45 °C sıcaklık ve %25 bağıl nem koşullarında ıslak hava kürü yapılan

%40 öğütölmüş YFC ikameli numunelerin sülfat dayanımı, kontrol karışımına göre daha yüksek çıkmıştır [137].

Fraay ve arkadaşları (1987), UK içeren harcın sülfat atağına etkilerini çalışmışlardır. Ayrıca YFC'li çimento harcı ile kontrol harcının sülfat direnci de araştırılmıştır. İki farklı tasniflenmiş kum iki farklı su içeriğıyle kullanılmıştır. Deney süresinde çeşitli zaman aralıklarında numunelerin boy değışimleri ölçölmüştür. Deney Na_2SO_4 çözeltisinin farklı derişimlerinde yürütölmüştür. Numuneler bağıl nemi sabit %95 olan bir kür odasında 1 ay süreyle küre tabi tutulmuştur. Sonrasında Na_2SO_4 çözeltisi içinde 6 ay bekletilmiş ve eğilme dayanımı, basınç dayanımı ile ultrasonik ses geçiş hızı değerleri ölçölmüştür. İnce yapıdaki UK iyi sülfat direnci sağlamıştır. Yüksek hava içeren numuneler (su+hava)/(çimento+UK) oranı arttıkça numune bünyesine daha fazla sülfat almıştır [138].

Kurtis ve arkadaşları (2001), C-S-H'nin parçalanması kadar, etringit ya da alçı oluşumu kaynaklı çatlamanın da dayanımda azalmaya neden olacağını belirtmiştir. Böylece oluşan her form sülfat atağının bir etkisidir ve bu etkiler basınç dayanımı ile gözlemlenebilmektedir [139].

Tokay ve Dilek (2003), yaptıkları proje çalışmasında kireçtaşı, tras, YFC ve UK içeren harçların sülfat direncini belirlemek için boy değışimi, ağırlık değışimi, mukavemet ve görsel yıpranma yöntemlerini kullanmışlardır. Deneyler ASTM C1012'ye göre şekillendirilmiştir. Harç numuneler 0,40 ve 0,60 s/ç oranıyla hazırlanmış ve %5'lik Na_2SO_4 , %2,5 Na_2SO_4 + %2,1 MgSO_4 ve %4,2'lik MgSO_4 çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Ayrıca benzer karışımlarda çimento hamurları üzerinde x ışını kırılma yöntemi ve elektron mikroskobu ile hidrasyon ürünlerinin yapı ve morfolojisi incelenmiştir [66].

Santhanam ve arkadaşları (2006), PÇ harçlarını deniz suyu ve zemin suyundaki farklı sülfat atağı etkilerine maruz bırakarak, harçlar üzerinde fiziksel, kimyasal ve mikro yapısal farklılıkları araştırmışlardır. Boy ve kütle değışimi ile basınç dayanımı periyodik olarak ölçölmüştür. Etringit, alçı ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşumlarının gözlenebilmesi

için SEM kullanılmıştır. Deniz suyundaki PÇ harçları zemin suyundakilere göre daha fazla sülfata direnci göstermiştir. Kütle kaybı her iki çözelti içinde de birbirine yakın çıkarken, genleşme ve dayanım kaybı zemin suyu çözeltisi içindeki numunelerde daha belirgin olmuştur [140].

Naik (2003)'in araştırmasında: Cohen ve Bentur (1988)'a göre basınç ve eğilme dayanımı sülfat çalışmalarında kısmen yeterli olduğunu, yumuşama ve dağılma kaynaklı hasar oluşumu öncelikle C-S-H'nin parçalanmasından kaynaklandığı için çok açık görülemediğini, sertleşmiş çimento hamurunun dayanımındaki azalmanın esas nedeninin C-S-H kaybı, erken yaşlardaki dayanım artışının nedeninin ise hidrasyon sürecindeki sülfat etkisiyle boşlukların dolmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca Herboe (1982), sülfata maruz çimentolu sistemlerin hasar belirtilerini incelemek için basınç dayanımı verilerinin tek başına yeterli olmayacağını belirtmiştir. Irassar (1990), eğilme dayanımının PÇ ve kompoze PÇ'nin sülfat direnciyle yakından ilişkili olduğunu belirtmiştir. Irassar'a göre çatlama mekanizmasını belirlemede çekme dayanımı, esneklik kapasitesi ve elastik modülün ölçümlerinin basınç dayanımı ölçümüne göre daha hassas olması beklenir. Eğilme yükü altındaki betonun çatlama hassasiyetinin artmasında, sülfat atağı sırasındaki portlanditin çözülmesinin geniş bir payı olduğu belirtilmiştir.

Sülfata maruz çimentolu sistemlerde oluşan etkileri gözlemlemek için uygulanan fiziksel ve mekanik yöntemleri karşılaştıran araştırmacılar tarafından bir limit belirleme gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda Cohen ve Bentur (1988)'a göre: kırışte %5 kütle kaybı, küpte %2,5 kütle kaybı, %0,4 genleşme ve %25 dayanım kaybı hasar limitidir. Mather (1982)'e göre harç çubuklarında %0,1 genleşme bir hasar limitidir. McMillan ve arkadaşları (1949) sülfata maruz çimento harç çubuklarının 28 günden sonra %0,1 genleşmesini hasar için limit olduğunu belirtmiştir. Monteiro ve Kurtis (2003), United States Bureau of Reclamation (USBR)'ye göre genleşme için limit olarak %0,5'i kullanmıştır. Ancak USBR'nin belirttiği genleşme limitleri betonlarda farklılıklar gösterdiği için çok net değildir [25]. Kurtis ve arkadaşları (2001) dayanım kaybı limitini literatürü de dikkate alarak %25–30 olarak değerlendirmiştir [89].

2.8.3. Mikro yapısal özelliklerin belirlenmesi ve görüntüleme sistemleri ile sülfat atağı etkilerinin belirlenmesi

Mikro yapısal özelliklerin belirlenmesi malzemenin mühendislik özelliklerinin tanımlanması için faydalı ve tamamlayıcıdır. SEM ve optik petrografi gibi bazı yöntemler sülfat etkilerini araştırmada oldukça yaygındır. Betonun sülfat etkisi altında mikro yapısal davranışını belirlemek için kullanılan bu yöntemler henüz standardize edilmemiştir. Ayrıca yumuşak iletilen x-ışını mikroskop inceleme, x-ışını tomografi ve enerji dağıtıcı x-ışını difraksiyonu (EDAX) gibi birçok diğer yöntem çimento örneklerinde kısıtlı uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin yaygınlaşmamasındaki engellerden bazıları kullanılan cihazların pahalılığı ve çok karmaşık olmaları ile kullanıcılarının uzman olması gerekliliğidir. Ayrıca çalışmayı yürütenlerin deneyler ve analizler konusunda yeterli olması gerekmektedir. Finansmanın, sistemin kullanılabilirliğinin ve faydalılığının artması ile bilgisayar programlarının gelişmesi sonucunda ileriki zamanlarda sülfat etkisi ile ilgili çalışmalarda bu sistemler kullanılarak daha faydalı bilgiler üretilebilir ve bu yöntemler standardize edilebilir.

Stark ve arkadaşları (2002) ile Naik ve arkadaşları (2006), ASTM I ve ASTM V çimento tipi, 0,485 ve 0,435 s/ç oranı ile agrega varlığının NaSO_4 etkisinin etkileri üzerinde hasarın oranı ve şeklini μBT ve enerji dağıtıcı x-ışını difraksiyonu (EDXRD) yöntemlerini kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Ayrıca genleşme ve basınç dayanımlarını da ölçmüşlerdir. ASTM Tip V çimento numuneleri, ASTM Tip I çimentosuna göre daha az çatlama ve genleşme göstermiştir. Çatlayan ASTM Tip I çimento hamurları için beklenmeyen bir sonuç olarak 0,435 s/ç oranlı örneklerde daha hızlı bir kırılma süreci açıkça görülmüştür. Ayrıca, harç içinde agreganın bulunmasıyla çatlak oluşum oranı çimento hamuruna göre artmıştır [46, 47].

Dulaijan (2007), Tip I, Tip V, Tip I+SD ve Tip I+UK çimentoları sırasıyla %1, %1,5, %2, %2,5 ve %4 derişime sahip MgSO_4 çözeltilerinde 24 ay süreli performanslarını incelemiştir. Harçların sülfat dirençleri gözlemsel değerlendirme, basınç dayanımındaki azalma, SEM ve EDAX yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Bozulmaların hangi sebeple olduğu mikroyapısal olarak SEM ve EDAX kullanımı

ile tahmin edilmiştir. En yüksek bozulma Tip I çimentoda görülmüştür. Diğerlerinin performansları birbirlerinden önemli derecede farklı olmuştur. Sülfat direncinin en yüksek olduğu çimentolar puzolan katkılı olanlardır [141].

Brown ve Doerr (2000), alan betonlarının içine nüfuz eden Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- ve CO_3^{2-} ’ın yaptığı kimyasal değişiklikleri analiz etmişlerdir. Mg^{2+} içeriği brusit ve M-S-H ’ı, SO_4^{2-} formu alçıyı, etringiti ve tomasiti oluşturmaktadır. Cl^- emilimi Friedel Tuzu’nun oluşumuna sebep olmaktadır. Sonuç olarak Na_2CO_3 oluşmaktadır. Beton numunelerden ince kesitler hazırlandıktan sonra karbonla kaplanmış ve Mg, Cl ve S atomlarının dağılımı mikroprob kullanılarak belirlenmiştir. Bileşenlerin oluşum mekanizmaları SEM ve EDS yöntemleri kullanılarak tartışılmıştır [142].

Justnes (2003), Norveç’te sülfat içeren tünel suyunda kireçtaşı içeren harçta tomasit oluşumunu erken tahmin edebilmek için bir araştırma yapmıştır. Deneyler %20 kireçtaşı ya da kuvars filleri içeren harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu harçlar 5°C sıcaklıkta alçıya doymun %5 Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilmiştir. Harçlar üzerinde 1 yıl süreyle boy değişimi, eğilme ve basınç dayanımı ölçülmüştür. SEM ve EDAX kullanılarak harçlarda etringit ve tomasit oluşumları incelenmiştir [143].

Blanco-Varela ve arkadaşları (2006), çimentolardaki C_3A içeriğinin tomasit oluşum oranına etkisini araştırmışlardır. Bununla birlikte tuz formlarının oluşumuna etkileri de değerlendirilmiştir. Araştırmada biri düşük diğeri yüksek Al_2O_3 içerikli iki tip çimento kullanılmıştır. Hidratasyondan sonra prizmalar kür ve karbonatlaşma için kısım kısım saf su içine daldırılmış ve $0-5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 5 yıla kadar bekletilmiştir. Diğer bir grup numune ağırlıkça %2 alçı çözeltisi içinde ya da ağırlıkça MgSO_4 çözeltisi içinde aynı koşullar altında bekletilmiştir. Örnekler farklı yaşlarda mineralojik ve mikro yapısal olarak incelenmişlerdir. Numunelerde karbonatlaşma XRD ile belirlenirken, karbonatlaşma sonrası CO_2 içeriği “Analysis Thermo-Differential / Analysis Thermo-Gravimetric (ATD/TG)” yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. İlerleyen süreçlerde harçların hidratasyon sonu, karbonatlaşma sonundaki mikro yapısal ve mineralojik özellikler XRD ve “Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR=Matematiksel Fourier Dönüşümü metodu)” yöntemleri

kullanılarak incelenmiştir. Bir yıl sonraki daha ileri mikro yapısal ve mineralojik özellikler ^{29}Si [^1H]CP/MAS NMR teknikleri kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca örneklerin mikro yapısal özellikleri 20 kv'ta SEM/EDX kullanılarak örneklerin yüzey veya çatlaklarındaki toz gelişimi de incelenmiştir [144].

Hunter (2004), BT kullanarak betondaki boşluk yapısı ve çatlakların yayılma özelliği üzerinde çalışmıştır. Araştırmada, GEO sırasındaki çatlak gelişimleri ve boşluk yapısı incelenmiştir. Her bir numunenin boşluk boyutları ve toplam porozitesi ile birlikte boşluk boyut dağılımı da belirlenmiştir. Aynı sonuçlar BT dışında, MIP yöntemi kullanılarak da belirlenmiştir. Ancak çatlak gelişimi MIP ile belirlenemediği için BT yönteminin çok daha etkili bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır [59].

2.9. Bilgisayarlı Tomografi

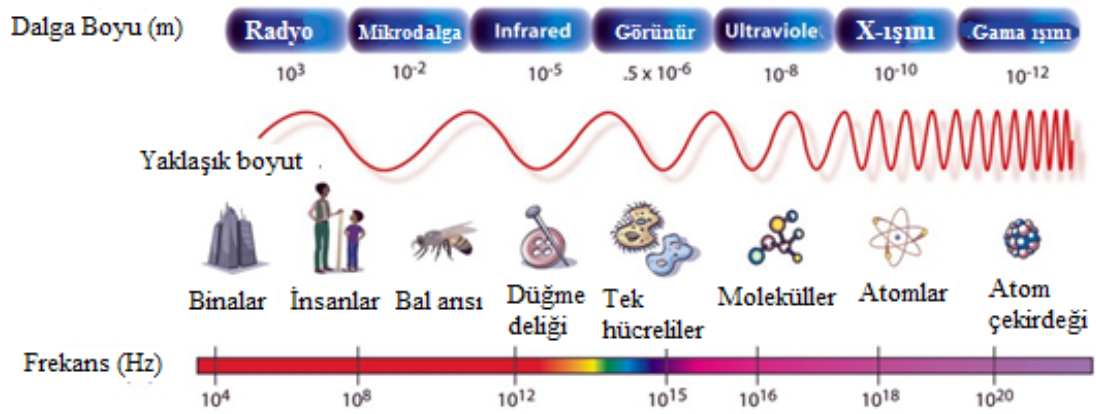
2.9.1. Bilgisayarlı tomografinin tanımı

Bilgisayarlı Tomografi (BT) maddenin çeşitli kalınlıktaki kesitinin iç yapısını görüntüleyebilen, x-ışını soğurulma katsayı matrisinin görüntüye dönüştürülmesi prensibi ile çalışan tahribatsız bir x-ışını teknolojisidir. X-ışını 1895'te Röntgen tarafından keşfedilmiştir. Nesnenin görüntüsünün oluşturulması için geliştirilmiş orijinal teori 1917'de Radon tarafından tanımlanmıştır. Radon görüntü oluşturma için gerekli birçok matematik temeli türetmiştir ve soğurulan enerji ışınlarının matematiksel olarak nasıl çözümlendiğini göstermiştir. Radon'un teoreminin geometrik açıklaması 1972'de BT adıyla bir teknik olarak meydana çıkmıştır. Cihaza BT tarayıcı adı verilmiştir [144].

BT'de "Tomografi" kelimesi Yunancadan türetilmiş bir terimdir. "Tomos" kelimesi Yunancada bölüm ya da kesit olarak tanımlanmaktadır. "Grafı" kelimesi ise yine Yunancada resim olarak tanımlanmaktadır. Bir tomografi bütün bir ekmekten kesilmiş bir ekmek dilimi gibidir. Radyolojik görüntüleme tekniği olan BT, Godfrey Hounsfield ve Allan Cormack tarafından 1970'lerde geliştirilmiş ve çalışmanın içeriği 1979'da Nobel ödülü ile sonuçlanmıştır [145].

BT prensiplerine göre, x-ışını örnek nesneden geçerken yoğunluğu (miktarı, enerjisi) madde etkileşimlerinden dolayı azalır. Bu madde etkileşimleri absorpsiyon ve saçılmadır. Bu soğurulmanın miktarı nesnenin atomik kompozisyonu ve yoğunluğu ile x-ışınının foton enerji spektrumuna bağlıdır (Bkz. Şekil 2.21) [146].

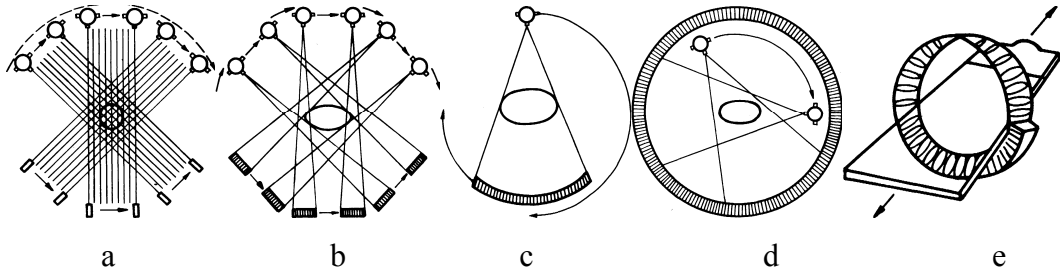
X-ışınlarının enerjilerinin eşitliği durumunda yüksek yoğunluklu malzeme, düşük yoğunlukluya göre daha çok x-ışını soğurur. Böylece yoğun malzemenin BT değeri, yoğunluğu daha az olan malzemenin BT değerine göre daha yüksek olur [145, 148]. BT tarayıcılar medikal amaçla icat edilmesine rağmen 1980'den beri petrol mühendisliği uygulamalarında geniş bir alanda kullanılmaktadır [149].



Şekil 2.21. Elektromanyetik spektrum [147].

2.9.2. BT Nesilleri

BT tarayıcılarda 1972'den sonra önemli gelişmeler olmuştur. Tarama süresini kısaltmak ve görüntü kalitesini artırmak amacıyla BT geçmişten günümüze beş nesil halinde geliştirilmiştir. Bu nesiller kaynak-detektör kombinasyonunun yerleşimine göre sınıflanmıştır. BT nesilleri Şekil 2.22'de gösterilmiştir.



Şekil 2.22. BT aygıtının gelişimi. a. tek detektörlü I. nesil, b. birden fazla detektörlü II. nesil, c. tüp ve çok sayıda detektörün birbirine bağlı 360° döndüğü III. nesil, d. detektörlerin sabit, tüpün hareketli olduğu IV. nesil, e. V. nesil [150].

Birinci nesil tarayıcılar

Birinci nesil BT tarayıcılarda tek kalem x-ışın kaynağı ve 3–6 adet alıcı kullanılır. Numunenin görüntüsü; x-ışını ve alıcının belli açılarda dönmesiyle oluşur. Bu tip tarayıcılar zaman açısından oldukça yavaştır. Her bir kesiti görüntülemek için yaklaşık 6–7 dk süre gereklidir. Bu tarayıcılar günümüzde kullanılmamaktadır [145].

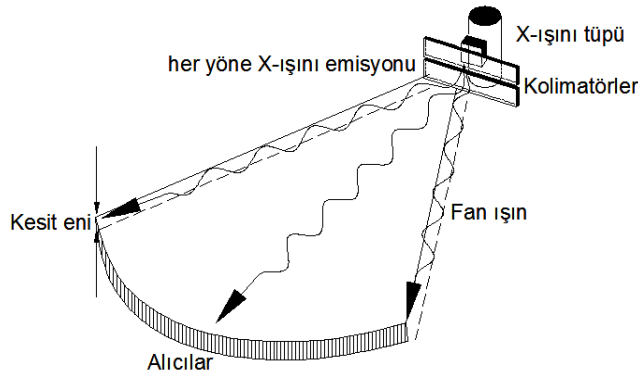
İkinci nesil tarayıcılar

İkinci nesil BT tarayıcılar ilerlet - döndür (translate-rotate) prensibiyle çalışırlar. Bu tarayıcılarda kullanılan detektörler (alıcı) 1. nesile göre daha fazla sayıdadır. Detektör sayısı 70'e kadar çıkmaktadır. Bu sebeple görüntü kalitesi iyileşmiştir ve her taramada numuneden daha çok veri toplanır. Bu tip tarayıcılar 1. nesile göre oldukça hızlıdır. Her bir kesiti görüntülemek için yaklaşık 15 s ile 2 dk gereklidir.

İkinci nesil BT tarayıcılarının iki dezavantajı vardır. 1) Limitli fiziksel özellikler: geniş aralıklı ışınlama sonucunda büyük detektör boşluğu (açıklığı) ve yavaş veri örnekleme, 2) Limitli bilgisayar gücü: Bilgisayar gücü; veri işleme ve yapılandırma algoritmalarının her iki alanında da limitli olmasıdır. Ayrıca tarama için uzun zaman gereklidir. 3. ve 4. nesil tarayıcılara oranla çözünürlükleri daha düşüktür. Bu BT'ler üretimden ve kullanımdan kaldırılmıştır [145].

Üçüncü ve dördüncü nesil tarayıcılar

3. ve 4. nesil tarayıcıların görüntü kaliteleri birbirine çok yakındır. Bu tip tarayıcılar tüm fiziksel değişimlerle 2. nesile göre daha yüksek çözünürlük sağlayabilmek amacıyla tasarlanmıştır. 3. nesilde her sırada 650–900 adet detektör gantry etrafında yay şeklinde dizilmiştir. 4. nesilde ise detektör sayısı 1440'a kadar çıkabilmektedir. Yeni nesil tarayıcıların geometrik üretim fonksiyonlarında çok fark yoktur, ancak tarama süreleri oldukça kısalmıştır. 3. ve 4. nesil tarayıcılardaki x-ışını tüpü eski nesillerde kullanılmayan fan ışını oluşturma yeteneğine sahiptir (Bkz. Şekil 2.23). Böylece kaynak ve detektörler nesne etrafında birlikte dönerek tarama hızı artırılmıştır. Bu geometri sayesinde tarama süreleri 30–40 s aralığında olabilmektedir.



Şekil 2.23 BT'nin kaynak ve detektör geometrisi

Özellikle 3. ve 4. nesil tarayıcıların her birinde yüksek teknoloji bilgisayarlar bulunmaktadır. Bu teknoloji sayesinde karışık algoritmalar çözülebilmektedir. Ayrıca bu tarayıcılarda daha yüksek çözünürlükler sağlanabilmektedir. Gelişmiş x-ışını ayarları ile yüksek çözünürlüğe sahip görüntü daha küçük kesitlerde oluşturulabilmektedir. Detektör açıklık boyutunun küçülmesiyle yüksek kaliteli veri elde edilmektedir [145].

3. nesil BT'lerin dezavantajları eş zamanlı kaynak ve alıcı yayının sabit pozisyonundan kaynaklanmaktadır. Bunlardan biri yayın merkez bölümünde bulunan

detektörler örnek ve kaynakla direk bir çizgi oluşturmaktadır. Bu sebeple havayı asla görmez. Böylece bu tip BT'ler diğer nesillerdeki detektörler gibi sürekli kalibrasyon işlemi yapmaz. Bundan dolayı detektörler veri ile yığılmış olur. Diğer dezavantaj ise çemberin merkezindeki her bir detektör sadece kesite giren aynı vokselleri görür. Sonuç olarak eğer kötü bir detektör takımı varsa, kötü verilerden oluşan bir görüntü oluşur. 4. nesillerde her bir detektör kesitin her bir vokselini gördüğü için tercih sebebidir. Bir miktar detektör dışında diğerleri "O" ring artefaktı oluşturur.

4. nesil BT sistemlerin de iki dezavantajı vardır. Bunun sebebi nesnenin etrafında konuşlanan çemberin içinde süreklilik sağlayan (birbirine bağlı ve çemberin tamamında) detektörlerin yüksek sayıda olmasındandır. 1) Fiziksel düzenden dolayı kullanılan detektör tiplerindendir. Bunlar 3. nesil detektörlerin çoğundan çok büyük açıklıklıdır. Bunun sonucunda uzaysal çözünürlük azalmaktadır. Bunu düzenlemek için hizalayıcı (kolimatör) detektörün dışına yerleştirilmiştir. Böylece açıklığın etkisi azalır. Ancak sonuçta atık radyasyon miktarı artar. 2) Detektörlerin yüksek sayıda oluşunun ilk finans ve bakım ücretlerini artırmasıdır [145].

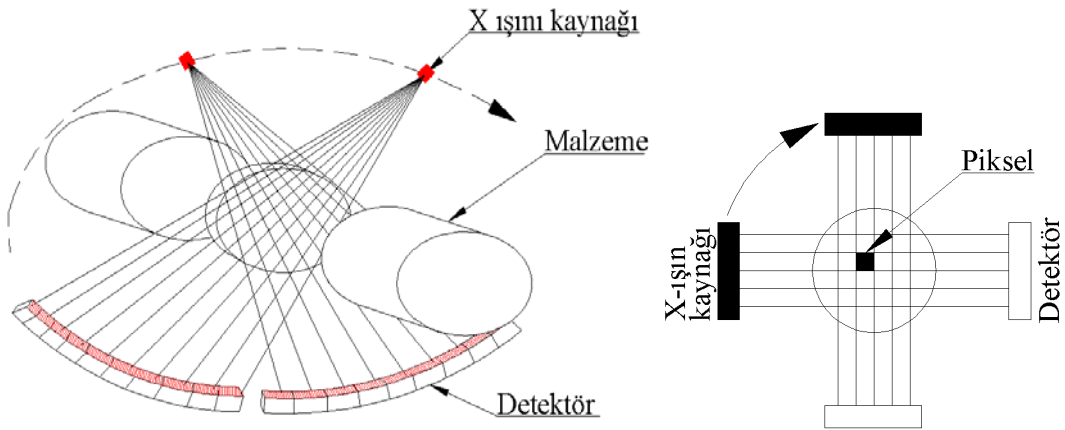
Beşinci nesil tarayıcılar

Günümüzde 5. nesil BT tarayıcılar en gelişmiş sistemler olarak görülmektedir. Bu sistemlerde sabit geometrili yöntem kullanılır. Bu yöntemde göre kaynak ve detektörlerin her ikisi de sabitlenmiştir. Dönüş ya da çevrilmeye ihtiyaç yoktur. X-ışını kaynağı (büyük bir tungsten yüzük) sabitlenmiştir ve tüm verilerin toplanması için gerekli süre 50–100 milisaniye mertebesinde [151].

2.9.3. BT'nin çalışma prensipleri

BT tarayıcılar nesnenin etrafında dönen bir x-ışını tüpü ve detektörü yardımıyla malzemenin x-ışını soğurulmasını ölçerek nesneden ekmek dilimi gibi kesilmiş enine kesit görüntüleri oluşturan bir sistemdir. X-ışınları projeksiyondan çıkan ışın huzmesi gibi nesneye gönderilir. Nesneden elde edilen enine kesit resmi ışın demetinin detektöre ulaşan miktarının sayısallaştırılmasıyla, bilgisayar kısmında bir

geri gösterim algoritmasının oluşması gibi düşünülebilir. Bu resim özel hacim elemanlarını veya taranan malzemenin voksellerini temsil eder. Bunun için BT’de tarama sırasında x-ışını kaynağı güç ile yüklendikten sonra x-ışını demeti nesnenin ince bir kesiti üzerine gönderilir (Bkz. Şekil 2.24). Kaynağın malzeme etrafında 360° dönmesi sonucunda malzemedan soğurularak geçen 700000’e kadar farklı x-ışını izdüşümü matematiksel çözümleme için yeterli olmaktadır. Bilgisayarların matematiksel çözümlemesi sonucunda sentezle oluşturulmuş bir resim görüntülenir [152]. Tarayıcı içinde hareket eden nesneden alınmış sıralı enine kesitler birleştirilerek 3 boyutlu bir resim elde edilir. BT’nin avantajı, soğurulma farklarının %0,1 seviyelerinde olması sebebiyle nesne içindeki $\leq 2 \text{ mm}^2$ alanı doğru bir şekilde ölçebilmesidir. BT’de bir nesnenin 3 boyutlu görüntüsü elde edildiğinde nesnenin içindeki herhangi bir kesitin görüntüsüne ulaşılabilir [145].

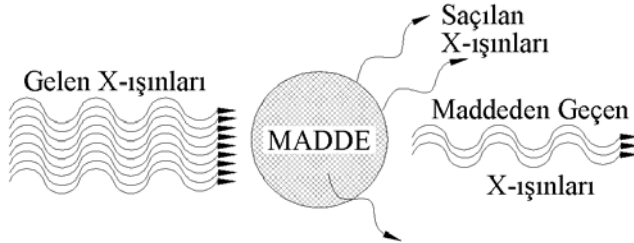


Şekil 2.24. BT’nin çalışma prensibi ve açıklaması [145]

2.9.4. X-ışını soğurulma prensipleri

X-ışını ultraviyole ve gama ışınlarının arasında, görünür ışıktan çok büyük frekansa sahip dalga formlarında, küçük enerji düzeyinde yayılan ışınlar olarak tanımlanır. X-ışınları nesneden geçerken absorpsiyon ve saçılma sebebi ile gücü (şiddeti) azalır (Bkz. Şekil 2.25.). Madde tarafından emilen x-ışını miktarı nesnenin atomik kompozisyonu ve yoğunluğu ile x-ışınlarının foton enerji spektrumuna bağlıdır

[150]. Aynı enerjiye sahip x-ışınları, yoğun maddeler (kaya gibi) tarafından az yoğun maddelere göre (su, yağ gibi) daha çok emilirler.



Şekil 2.25. X ışınlarının atenuasyonu (sayıca azalması)

BT’de detektörler lineer soğurulma katsayılarını (μ) ölçerler. İletilen x ışını şiddetleri ölçülür ve detektörler tarafından kaydedilir. Kaydedilen veri 2 boyutlu pikseller içinde sayılara dönüştürülür. Bu sayılar bir takım tahmin ve düzeltme serisi olarak pikseller içinde numaralandırılmıştır. BT kesiti her biri kendi karakteristik soğurma katsayılarına sahip birçok hacim elemanından (voksel) oluşur. Vokseller 3 boyutlu görüntü matriksini, pikseller ise 2 boyutlu görüntü matriksini oluşturur. Wellington ve Vinegar [149] ile Withjack [153] x-ışını soğurulma prensibini; BT görüntüsündeki her pikselin temel nicelik ölçümü lineer atenuasyon katsayısı (μ) olarak açıklamışlardır. Bunu Beer Yasası şu şekilde tanımlar:

$$I = I_0 \cdot e^{(-\mu x)}, \quad (2.29)$$

I = Maddeden geçip soğurulduktan sonra geriye kalan x-ışını şiddeti

I_0 = Maddeye gelen x-ışınının şiddeti

x = X-ışınının örnek üzerinde aldığı mesafenin miktarı (örneğin kalınlığı)

Beer yasası iyi hizalanmış bir ışın ve monokromatik x-ışını kaynağını varsaymaktadır. Monokromatik ışın demeti birbirine çok yakın x-ışını enerji düzeyini temsil eder. Medikal BT’lerdeki x-ışını tüpleri çok farklı seviyelerde (polikromatik) x-ışını enerji tayfı yayar. Bu sebeple “ışın sertleşmesi” hatası oluşur [149]. X-ışını emilimini tanımlamada homojen ortam için tek yöntem “Eş 2.30”da verilmiştir:

$$I/I_0 = e^{[-(\mu/\rho)\rho \cdot h]} \quad (2.30)$$

μ/ρ = kütle atenuasyon katsayısı

ρ =Ortamın yoğunluğu

h =Malzemenin kalınlığı olarak tanımlanır.

Eğer x-ışını yolu üzerinde birkaç malzeme bulunuyorsa Beer Yasası:

$$I/I_0 = e^{[-\sum(\mu_i/\rho_i)\rho_i \cdot h_i]} \quad (2.31)$$

i =Malzeme sayısı

Eğer madde bileşenlerin karışımı halindeyse, karışımın toplam kütle soğurma katsayısı şöyle olacaktır:

$$\mu_{min} = \sum \mu_i \cdot S_i \quad (2.32)$$

S =Fazın doygunluğu

S_i =I bileşenine ait maddelerin hacmi, örneğin su, yağ ya da gaz [145].

X-ışınının absorpsiyonu farklı mekanizmalar içerir. Bu mekanizmalar gelen x-ışınlarının enerji seviyeleri ile ilişkilidir. Genelde lineer soğurulma katsayısı (μ), elektron yoğunluğu (ρ) ve atom numarasının (Z) her ikisine bağlıdır. Eğer enerji 100 keV üzerine çıkarsa μ daha çok elektron yoğunluğuna (Compton saçılması) bağlı olur. Enerji düzeyi 100 KeV'un altına düşerse foto elektrik absorpsiyon ana mekanizma olur ki bu durum malzeme çalışmalarında daha çok atomik numaraya (Z) bağlı olmaktadır. Bu sebeple alışılmış BT'lerde çift enerji sistemi kullanılır. Efektif atom sayısını belirlemek için düşük enerjide ikinci tarama yapılabilirken, yüksek enerjili tarama genel (yığın) yoğunluğunu belirlemek için kullanılabilir. Daha ağır elementler daha büyük fotoelektrik kesite sahiptir. X-ışını enerjisi düşük olduğunda fotoelektrik etki hızlıca artar [145, 154, 155]. Böylece lineer soğurulma katsayısı (μ) absorpsiyon ve saçılma parametrelerinin bir fonksiyonu olarak şöyle yazılabilir:

$$\mu = \rho(a + b \cdot Z^{3,8} / E^{3,2}) \quad (2.33)$$

a =Klein-Nishina katsayısı $b=9,8 \cdot 10^{-24}$ sabit katsayı E =Enerji seviyesi (KeV)

Eşitliğin ilk terimi Compton saçılmasını göstermektedir. İkinci terim fotoelektrik absorpsiyon için verilmiştir. Atomik karışımlar bulunduğunda fotoelektrik absorpsiyon efektif atom sayısı ile orantılıdır. Böyle bir durumda “Eş. 2.34” yazılır:

$$Z_e = (\sum f_i \cdot Z_i^{3,8})^{1/3,8} \quad (2.34)$$

$f_i = i$ 'inci atom numarası türleri üzerinde elektronların kesirleri

Örneğin; suyun (H_2O) efektif atom sayısı 7,54'tür. Çünkü suda, hidrojen atomunun 2 elektronu, oksijen atomunun 8 elektronu bulunmaktadır.

$$Z_{e_{su}} = [2/10(2^{3,8}) + 8/10(8^{3,8})]^{1/3,8} = 7,546$$

Bu örnekte görüldüğü gibi, BT ile ölçülen efektif atom sayısı yüksek atom sayısının bileşenlerine doğru ağırlıklı oranda kayar. Kütle soğurma katsayısı kompozisyona, yani malzemenin yoğunluğu ve atomik sayısı ile ışının foton enerjisine bağlıdır [151, 154]. Çok bileşenli voksellerde (örneğin mineral tanecikler ya da porozite) atom sayısına bağımlılık ağırlıkça her bir bileşenin hacimsel kesirinin tarafındadır. Bu durum Parsiyel (kısmi) hacim etkisi olarak adlandırılır. Böylece voksel içinde kalan malzemenin yoğunluğu ve kompozisyonu lineer soğurma katsayısı ile belirlenir [151, 156]. BT veri çıktısı geleneksel lineer zayıflama katsayısı (cm^{-1}) değildir. X-ışını zayıflama katsayısı her malzemede uygulanamayacağı için Hounsfield Unit (HU ya da BT değeri) uluslararası standart birimi üzerinde yeni bir ölçek olarak tanımlanmıştır. Lineer Hounsfield ölçeği iki noktada tanımlanır. Absorpsiyon değerleri olarak hava ve su için sırasıyla -1000 HU'dan 0 HU'ya kadardır. Bundan dolayı her bir BT birimi %0,1'lik farkla zayıflama katsayılarını simgeler. BT değerleri, BT görüntüsündeki her bir küçük alanda ortalama x-ışını zayıflamalarının birleşimini sembolize eder. X-ışınının zayıflamasında ölçülen değerler uluslararası Hounsfield ölçeği kullanılarak HU değerlerine dönüştürülmüştür. Literatürde bazı malzemeler için tanımlanan HU değerleri Çizelge 2.7'de verilmiştir. HU değerleri normal dağılım eğrilerinden aritmetik ortalama alınarak tanımlanmıştır.

$$HU (BT \text{ değeri}) = \frac{1000 \times (\mu_{\text{maddesi}} - \mu_{\text{su}})}{\mu_{\text{su}}} \quad (2.35)$$

Eşitlikteki 1000 sabit sayısı büyütme faktörü

μ_{maddesi} =Hesaplanan efektif lineer x-ışını zayıflama katsayısı (maddeden geçen)

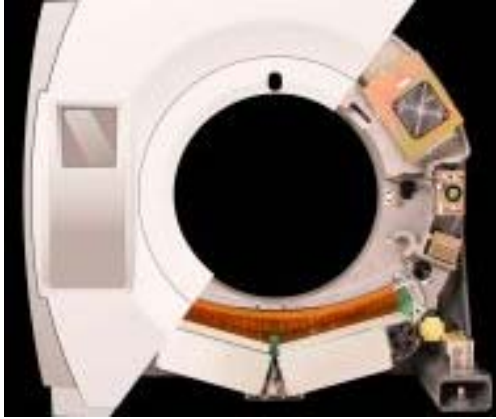
μ_{su} =Su için x ışını zayıflama katsayısı olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 2.7. Çeşitli maddelerin BT numaraları (HU) [45, 60, 145]

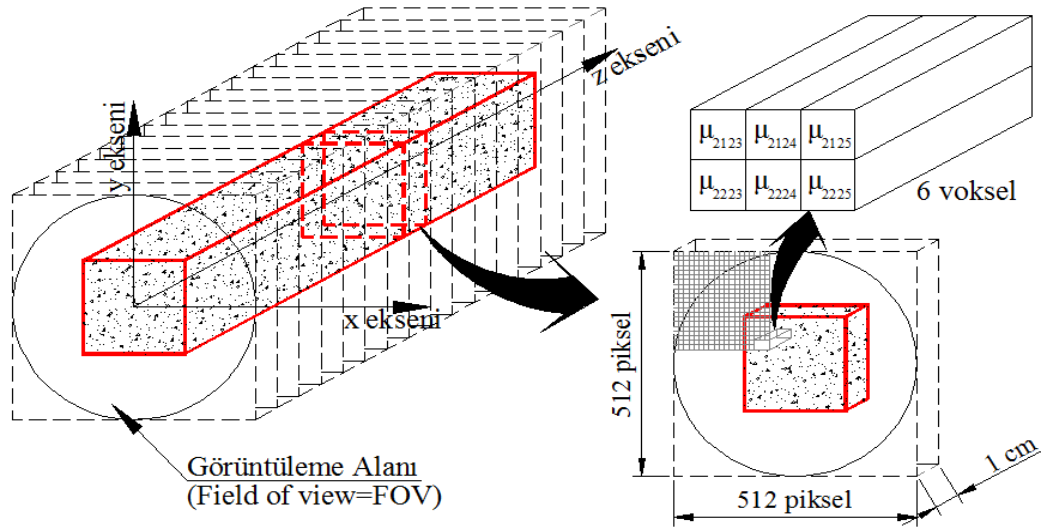
Madde	HU	Madde	HU
Kum (kuru)	400	Danion tebeşiri (ıslak)	1280
Kum (suya doymuş)	600	Fiberglas	870
Su	0	Traverten (kuru)	700
Yağ	-50	Traverten (ıslak)	1550
Hava	-1000	Standart CEN kumu (kuru)	849
Sertleşmiş çimento hamuru 28 gün yaş	1731	Standart CEN kumu (suya doymuş)	1269
Çimento toz halde	1038	Beton	900–1800

2.9.5. Tarama süreci

Bir x ışını tüpü kolime edilmiş ışınların farklı enerji seviyelerindeki tayfını nesneye gönderir. Tek bir detektör nesneden geçen çizgi halindeki zayıflamış x ışınlarını kaydeder. Bu veri lineer zayıflama katsayısıdır. Her bir x ışını gönderildikten sonra gantry (Bkz. Şekil 2.26) döner ve sonraki x ışını tayfı aynı kesitten çok az farklı bir açıyla geçer. Dönüşte her bir açı (1°-3°) için bir zayıflama katsayısı gözlemlenir. Gantry 360° döndüğünde görüntülenecek kesit için gerekli matematiksel işlemlerin verileri (dizileri) oluşur. Nesne gantry içinde hareket ederek diğer görüntülenecek kesitlerin işlemleri dizisel olarak sürer. Örneğin Şekil 2.27 lineer zayıflama katsayılı görüntü desenini göstermektedir. Dizisel enine kesitlerden her biri bilgisayar tarafından oluşturulur. Bu görüntüler ile nesnenin 3 boyutlu simülasyonu gerçekleştirilebilir. Renkli ve özel amaçlı görüntüler çeşitli görüntü analiz programlarıyla şekillendirilebilir [156].



Şekil 2.26 BT sisteminin bir parçası olan gantry



Şekil 2.27. Lineer atenuasyon katsayısı görüntüleme örneği [145]

2.9.6. Yeni görüntü oluşturma temelleri

X-ışınları nesneden geçerken zayıflar. Nesne tarafından emilen x-ışınları sayesinde malzemenin içyapısı hakkında bilgi sağlanır. Lineer zayıflama katsayısı (μ) detektörler tarafından iki boyutlu olarak ölçülür. Piksellerin çeşitli pozisyonlarıyla zayıflama katsayıları oluşturulur. Malzemenin içyapısını görüntülemek için çeşitli yenileme (reconstruction) metotları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır:

1. Kıvrım metodu
2. Hızlandırılmış Fourier dönüşüm yöntemi (FFT)
3. Matriks inversiyon (tersleme) yöntemi
4. Tekrarlı yeniden oluşturma
5. Geri izdüşüm metodu (Back Projection)

Yenilemenin (reconstruction) basitleştirilmiş açıklaması şöyledir: Şekil 2.28’de görülen bir kare nesne 2x2 piksel matriksine bölünmüştür. (A) için; x-ışını nesneden yatay olarak geçmiş ve sırasıyla 1 ve 2. satırlar için ışın toplamı 2 ve 4 olarak belirlenmiştir. Düşeyde 1 ve 2. sütunlar için kendi ışın toplamaları 1 ve 5 olarak belirlenmiştir. Yatay ve düşey x-ışınlarının toplamı bilindiğinde, tekrarlı yeniden oluşturma metoduyla her bir bölünen piksel değeri hesaplanabilir. Örneğin: Yatay ve düşey yönlerde toplam ışın miktarları aynı ve 6’ya eşittir. Eğer bu 4 piksele bölünürse, ortalamaları 1,5 olur. Piksel sonuçları için ayrılan ortalama sayılar toplandığında (her bir yatay ve düşey düzlem için) ışın toplamaları tüm satır ve sütunlarda 3’e eşit olur (B). Yatay yöndeki yeni ışın toplamaları eski değerler ve piksel değerleri ile karşılaştırılır. Sonuçlar ilk verilere göre (ilk değerlere ulaşmak üzere) ekleme ve çıkarmalar yapılarak düzeltilir. Her bir piksel için bu matematiksel işlem gerçekleştirilir. Sayılar her bir yön için aynı miktarda ve aynı işlemlerle çalıştırılır. Yani yatayda işlem yapılıyorsa 1. pikselden sayı azaltıldığında 2. pikselden de aynı sayı azaltılır. Ancak düşeyde tam ters işlem yapılarak aynı sayı değerinde piksel değeri artırılır. Her piksel için eklenen fark ilk satır için -0,5 ikinci satır için +0,5’dir (C). Yataydaki düzeltmeden sonra yeni piksel numaraları hesaplanır ve bu sefer düşey doğrultudaki işlem ölçülür (D). Sonra yataydaki işleme benzer düzeltmeler düşey yöndekiler için de yapılır. Düzeltmeler 1 ve 2 sütunlarında sırasıyla -1 ve +1 eklenerek yapılır (E). Düşey düzeltmeden sonra (F) ilk ölçümlere göre tutarlı sonuçlara ulaşırsa işlem tamamlanmış ve piksel sayıları oluşmuştur (A).

(A)			(B)			(C)	
?	?	2	1,5	1,5	3	1,5-0,5	1,5-0,5
?	?	4	1,5	1,5	3	1,5+0,5	1,5+0,5
1	5		3	3			
(D)			(E)			(F)	
1	1	2	1-1	1+1		0	2
2	2	4	2-1	2+1		1	3
3	3					1	5

Şekil 2.28. Tekrarlı yeniden oluşturma örneği [154]

Tomografinin kesit kalınlığındaki bir hacim elemanını pikseller temsil eder. Her bir piksel bölünmüş hacim elemanının karakteristiklerini gösteren BT numarası içerir. Bu sayılar monitörde ya da katot ışın tüpünde gri ölçekli bir görüntü oluşturabilmek için kullanılır [157, 158]. BT değerleri havayı simgeleyen -1000'den başlar ve yoğun malzeme için +3000 değerine kadar çıkar. Eğer siyah renk -1000'i temsil ederse beyaz renk +3000'i simgeler. Böylece siyah ile beyaz renk arasında ~4000 sayı olur ve ekrana ~4000 siyahtan beyaza giden bir tonlama kartelâsı görünür. Bu kartelaya kontrast adı verilir. Ancak insan gözü 40'dan fazla renk tonunu algılayamaz. Bu sebeple gözlemciler pencere tekniğini kullanarak 4000 BT numarasını ayırmışlardır. Bunun için en alt ve en üst değerlere saf siyah ve saf beyaz tonu seçmişlerdir. Örneğin; pencere seviyesi (Window level)=0 ve genişliği 600 HU olan resmin görüntüsü için, -300 saf beyazı temsil ederken, +300 saf siyahı simgeleyecektir. Bu 600 HU 40 adıma ayrılır. Her adım 15 HU'yu içerir. Her HU 0,001 g/cm³ yoğunluk artışına karşılık gelirken her bir adım %1,5 yoğunlukta sapmayı simgeler [145].

Birçok görüntü işleyici 64 gri seviye üzerinden görüntüleri oluşturur. HU değerleri temel alındığında görüntü oluşturmak için her bir voksel 64 gri seviyeden birini simgeler [151].

2.9.7. BT’de oluşan görüntü hataları

Işın sertleşmesi etkisi (Beam Hardening Effect)

Işın sertleşmesi etkisi x ışınının madde üzerinde aldığı yolda yoğunluğu çok az olan kısımdan yoğunluğu çok yüksek olan kısma (hava/madde) geçerken ara yüzeyde oluşan ve yüksek BT numaralarının oluşması ile sonuçlanan bir görüntü hatasıdır [151, 157]. Genel olarak görüntü oluşumu aşamasında monoenerjitik x ışını kullanıldığı varsayılır. Ancak BT’de geniş bir enerji tayfına sahip polienerjitik x ışınları kullanılmaktadır. Yani x ışını tüpünden çıkan fotonların hepsi aynı enerjiye sahip değildirler. Farklı enerji seviyelerine sahip x ışını fotonları malzeme içinde yol alırken düşük enerjili olanları öncelikli olarak malzeme içinde emilir. Malzeme içinde emilmeden yoluna devam eden ışınlarının ortalama enerji seviyesi yüksek değerlerde kalmaktadır. Bu durum ışınların sertleşmesi olarak açıklanır. Işın sertleşmesi nispeten büyük nesnelerde daha çok gerçekleşmektedir. Ayrıca yüksek yoğunluğa sahip malzemelerin çevresinde yüksek BT değerleriyle parlak beyaz olarak görüntülenir. İlaveten homojen malzemelerin merkezinde x ışını zayıflama (atenuasyon) katsayısının değişimine neden olur. Eğer lineer olmayan ışın sertleşmesi dengelenmezse görüntüdeki hata gri ölçekte görülecektir [145].

Özellikle beton numunelerde bulunan keskin kenarlarda ışın sertleşmesi problemi yoğun olarak görülmektedir. Numune kenarlarında oluşan bu hatanın sonucunda kenara yakın yerlerde çözünürlük azalmaktadır. Böylece numunenin bu kısımlarını tanımlamak zorlaşmaktadır. BT değerlerindeki hata ile numunenin kenar kısımlarının porozite, yoğunluk gibi özellikleri hakkında kesin bilgiye ulaşılamayacaktır.

Işın sertleşmesi etkisini azaltma teknikleri

Diğer detektör tabanlı hatalar kolay fark edilebilirken ışın sertleşmesi hatası belirlenebilmesi zor ve oldukça problemli bir hatadır. Işın sertleşmesi etkisini azaltmak için kullanılan ilk yöntem gelişmiş bir kalibrasyon ile numune, tarayıcı ve tarayıcı yazılımı değişikliklerini de içeren kalibrasyon yapılmasıdır [145].

Elaqra ve arkadaşları çimento harcının kırılma mekaniğini gözlemlemek için kullandıkları BT’de ışın sertleşmesinden kaynaklanan artefakt oluşumuna karşı tarama işleminden hemen sonra görüntü oluşturma sırasında Fourier domain işleminde band-pass filtre kullanmışlardır. Ayrıca düşük enerji seviyeli ışınların tutulması için 0,3 mm kalınlığında bakır bir filtre tüp önünde ayarlanmıştır [57].

Yoğunluğu yüksek olan malzemelerde oluşacak ışın sertleşmesini engellemek için numune boyutu küçültülebilir. Geleneksel BT’lerin hepsinde düşük enerji düzeyleri için ışın sertleşmesi dengeleme düzeltmesi yapılabilmektedir. Standart tek enerji düzeyli ışın sertleşme düzeltmeleri sadece kuvars gibi tekil atomik kompozisyon için yapılabilmektedir. Çok bileşenli malzemelerde ise düzeltme için çift enerjili ön oluşturma tekniği gerekmektedir ki bu ekipmana sahip BT’ler oldukça pahalıdır. Diğer bir düzeltme yöntemi x ışınının alüminyum ve bakır filtreler aracılığı ile sertleştirilerek kalitesini artırmakla olmaktadır. Dolayısıyla emilen yumuşak ışınların hesaplamaya karışması engelleneceği için düzenleme yapılmış olur [145]. Ayrıca tarama sırasında malzemeyi solüsyon içinde bulundurmak, kum içine gömmek, numuneyi silikon jel, PVC, karbon fiber ile kaplamak gibi yöntemlerle de ışın sertleşmesi etkisi azaltılmıştır [151].

Foton saçılması

Bu tip görüntü hataları x ışınlarının emilimi ile saçılmasının her ikisinin birlikte bir sonucudur. Malzemeye gelen x ışınlarının bir kısmı malzeme tarafından emilirken atomik boyutta etkileşimler oluşur. Bu etkileşimlerden biri ışının enerjisinin azalması, diğeri ise atomik düzeydeki çarpışma sonrasında saçılmadır. Detektörler saçılan ışınların %5 – 50’si kadarını yakalarlar. Bu durum ölçümlerde hataya neden olur. Bu hatanın sonucunda görüntünün kontrastı azalır. Saçılan ışınların detektörlere ulaşması engellenerek görüntü hatası düzenlenebilmektedir. Bu sebeple kolimasyon ve spektrum pencereleme işlemleri gerçekleştirilir. 3. nesil BT’lerde detektör parçalarında kolimatörler kullanılarak saçılma azaltılırken, 4. nesil BT’lerde zayıf anti saçılma kolimasyon işlemi olumludur, ancak sayısal düzeltme gerektirir [145].

Hatalı detektör etkisi

Detektör takımının herhangi birinde oluşan bozulmanın sonucunda lineer zayıflama katsayıları düzgün olarak hesaplanamadığından BT değerlerinde ve sonuç olarak görüntü oluşumunda hataya neden olacaktır. Pikseller ve voksellerin aldığı değerlerdeki düzensizlik, görüntünün üzerinde bir çizgi oluşmasına ya da görüntünün kaymasına sebep olur. Bu tip durumlar donanımsal hatalar olup özellikle 2. ve 4. nesil BT'lerde ve 3. nesil BT'lerin yüzük kısımlarında meydana gelmektedir [145].

Görüntü oluşturma sırasında matematiksel hatalar

Bu tip hatalar genellikle yazılımdan kaynaklanan matematiksel işlemlerin oluşturduğu piksellerin hatalı değer alması ile meydana gelir.

X şekilli görüntü hataları

Bu tip hatalar malzemelerin şekillerinden kaynaklanan görüntü bozukluğu hatalarıdır. BT'lerde şekilsel hataların en az olduğu malzemeler silindirik şekilli olanlardır. Kare ve dikdörtgen prizmatik şekillerin tarama sonrası görüntülerinde X harfi şeklinde koyu olarak bir alan oluşur. Bu X harfine benzeyen koyu kısım hata olarak tanımlanır. Kare ve dikdörtgen kesitli malzemelerde kenar uzunlukları köşe uzunluklarına göre daha kısadır. X ışınları bu farklı mesafelerden geçerlerken farklı x ışını atenuasyonları gerçekleşir. X ışını köşeden geçerken malzemenin ışın emme miktarı artarken HU da bu kısımlarda artar. Aynı bölgenin kenar doğrultusunda x ışını daha az miktarda emilir. Bu sebeple dörtgen şekilli heterojen malzemelerin köşe eksenlerinde HU artarken, kenarlarda HU azalır. Bu heterojen malzemelerin morfolojik tanımlanmasını güçleştiren bir durumdur [145].

Pozisyon hatası

Pozisyon hataları çıkarma metodu kullanımında porozite ve doygunluk belirlemede bir rastlantısal hatadır. Aynı numune üzerinde aynı nokta üzerinde yapılacak

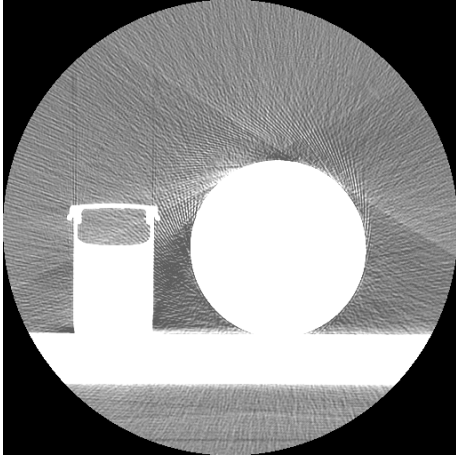
analizleri gerçekleştirebilmek için, numune gantry içindeki tablaya her seferinde aynı noktaya yerleştirilmelidir. Tabla 3 eksenli bir koordinat sistemi içinde numaralandırılmış olup bu bilgiler BT tarayıcının bilgisayar ünitesinde (0, 0, 0) noktası olarak kabul edilir. Tabla yüksekliği, x, y ve z eksenlerinin numunenin bir noktasına hizalanması, hedefleme çizgileri olan lazer çizgilerinin numunenin aynı noktasında bulunması pozisyon hatasını engelleyen durumlardır. Ancak BT kesitlerinin 1 mm kesit kalınlığından daha az boyutlarda alınabiliyor olması ve lazer ışınlarının kalınlığının ~ 1 mm civarlarında olması mikron mertebesinde pozisyon hatalarına sebep olabilmektedir. Bunun yanı sıra önizleme için görüntü oluşturulması aşamasında operatör tarafından yazılımsal hizalamada yapılacak hatalar görüntü oluşturmada meydana getireceği hatalar numunenin farklı süreçlerde aynı noktalardan görüntü oluşturulmasını engelleyen bir durumdur. Bu durum hassas çalışma yapılarak dengelenebilmektedir [145].

Kısmi Hacim Etkisi

Kısmi hacim terimi x ışınını yüksek miktarda soğuran objelerin kesit düzlemi içerisine kısmen girmesi olarak tanımlanır. Voksel içinde birkaç farklı fazın birlikte bulunduğu durumlarda görüntüdeki pikselin atenuasyon değeri, gerçekte pikselin bağlı olduğu vokselin ortalama atenuasyon değeridir. İki veya daha fazla obje tek voksel içinde ise farklı yönlerdeki ölçümlerde farklı ölçüm sonuçları oluşur. Birbirleriyle tutarlı olmayan bu ölçümler çizgi artefaktı oluşturur. Bu tür artefaktlar ince kesitler seçilerek azaltılabilir [156].

Geometrik Artefaktlar (Aliasing)

Keskin kenarlı cisimler ince çizgiler şeklinde görüntü hatalarına neden olur. Üçüncü nesil makinelerde ise detektör kalibrasyonlarının yetersiz oluşu "ring" artefaktı denilen iç içe geçmiş ince halkalardan oluşan dairesel görüntü hatası oluşturur [158]



Şekil 2.29. Geometrik Artıfakt (Ring Artıfaktı)

2.9.8. X-ışınının madde üzerindeki etkileri

X-ışınları elektromanyetik radyasyon sınıfında olup iyonizan etkiye sahiptir. Elektromanyetik radyasyonların hızları ışık hızına eşittir. Nokta ışık kaynağından yayılan elektromanyetik radyasyonların etkileri, uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak azalır. Elektromanyetik radyasyonların dalga boyları çok küçük olduğu için direk atomla etkileşir ve bundan dolayı iyonizan etkiye sahiptir. İyonizan radyasyonları diğer ışık ya da dalgalardan farkı fotonun taşıdığı enerjidir. X-ışını fotonunun enerjisi, maddeyi geçerken birçok atomun elektron sayısını değiştirebilir ve birçok moleküler bağı çözebilir. Bir fotonun enerjisi 15eV veya daha fazla ise atom veya molekülleri iyonize edebilir [159, 160].

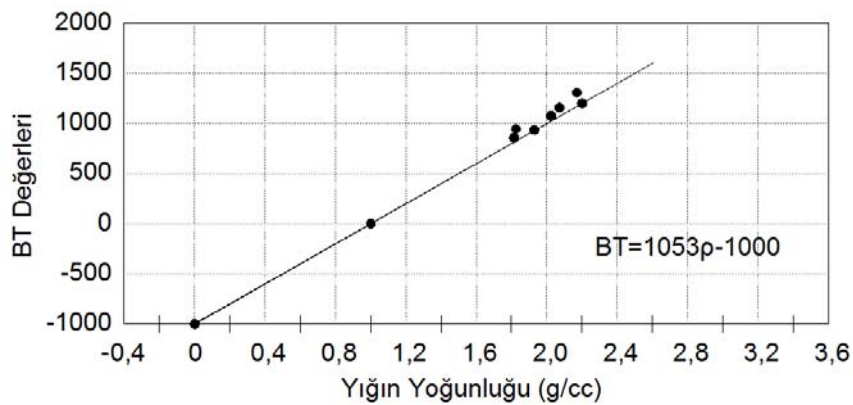
X-ışınları katı, sıvı ve gaz maddeleri iyonlaştırma özelliğindedir. Katı maddelerdeki iyonizan etkisine örnek olarak Gümüşbromür (AgBr) molekülünün x-ışını etkisinde Ag^+ ve Br^- iyonlarına ayrıştırması söylenebilir. Ayrıca x-ışınları oksijen (O_2) molekülünü de etkileyerek ozona (O_3) dönüştürmektedir. [161]. X-ışınının sıvılardaki iyonizan etkisi ile su molekülü iyonlaşır, H^+ ve OH^- iyonlarını oluşturur. Buna suyun radyolizi denir. Suyun radyolizi sonucunda yaklaşık 1 milisaniye süre içinde H^+ ve OH^- serbest kökleri oluşur. Bunların enerji fazlaları diğer molekülleri etkileyerek moleküler bağları çözebilir. Ayrıca serbest köklerin birleşmesi sonucu, hidrojen peroksit (H_2O_2) oluşabilir [160]. Bu madde şiddetli bir oksidan maddedir.

Elementlerin dış orbitlerindeki elektronlar kimyasal reaksiyonlarda önemli rol oynar. Radyasyon etkisiyle bu elektronların sökülmesi, maddenin kimyasal özelliğini değiştirir. İki değerlikli demirin sülfat bileşiği, X-ışınlarının etkisinde bırakılırsa üç değerlikli şekle dönüşür [162].

2.9.9. BT'lerin kalibrasyonu

Her ölçüm cihazında olduğu gibi BT'lerde de belirli süreçlerde kalibrasyon yapmaya ihtiyaç vardır. Fantomlar BT'lerin kalibrasyonu için bilinen en yaygın yöntemlerdir. Fantomlar genellikle içlerinde saf su olan ve çeşitli enerji seviyelerindeki taramalarda BT değerleri bilinen ekipmanlardır. Bunun dışında hava, çeşitli metaller, plastik, teflon, çeşitli saf kayalar, yağlar da BT kalibrasyonu için kullanılırlar. Bu maddelerin BT değerleri bilindiği için BT sisteminde çeşitli enerji seviyelerine ait kalibrasyon değerleri kaydedilir. Bundan sonraki yapılacak taramalarda HU değerleri kaydedilen değerlere göre otomatik olarak tanımlanır [153].

Malzemeler için HU değerleri ile yığın yoğunlukları arasında lineer bir ilişki bulunmaktadır [151]. Bu ilişki kullanılarak kalibrasyon değerleri oluşturulabilir. Optik camlardaki gibi (yığın yoğunluğu=2,20 g/cm³) kumtaşı üzerindeki BT ölçümleri için kalibrasyon ve ışın sertleşmesi düzeltmeleri açısından oldukça verimlidir. Şekil 2.30'da optik camı ve bir kısım kumtaşının bulunduğu kalibrasyon eğrisi verilmiştir [149].



Şekil 2.30. Kalibrasyon yığın yoğunluğu için eğrisi [149]

2.9.10. Bilgisayarlı Tomografi ile ilgili yapılmış önceki çalışmalar

Tekin (2005) ve Tekin, Birgül ve Aruntaş (2007), yaptıkları çalışmalarda PÇ 42,5 çimentosuna ikame edilen % 0, 5, 10 ve 15 oranlı pomza tozunun 100 günlük porozite gelişimine etkisini, GE HiSpeed CTi model bir BT kullanarak belirlemiştir. Çalışmada basınç dayanımı-porozite ilişkisi ile birlikte diğer fiziksel özellikleri de araştırmıştır. Sonuç olarak porozitenin bütün numunelerde 100 günlük süreçte kapanma eğilimine girdiğini, ikameli harçlarda basınç dayanımının düştüğünü ve pomza tozu ikamesinin makro boşlukların miktarını azalttığı görülmüştür [33, 34].

Martz ve arkadaşları (1991 ve 1993), BT sisteminin betonarmede kullanımı üzerine çalışmışlardır. Bunun için, bir silindir numunede uzunlamasına doğrultuda boşluk oluşturulmuştur. Bu boşluk, yoğunluğu ve atom numarası yüksek bir malzeme ile doldurulmuştur. Ayrıca numunenin içine diyagonal şekilde donatı yerleştirilmiş ve sonrasında BT ile görüntülenmiştir. Sonuç olarak BT betonarme içinde beton, demir ve boşlukların görüntülenmesini sağlamıştır [48, 49].

Morgan ve arkadaşları (1980), betonla ilgili çalışmalar için yeni bir BT sistemi geliştirmişlerdir. Bir Cs-137 izotop kaynağı kullanılarak 662 keV foton ışını elde edilmiştir. 150 mm çaplı çeşitli çimento-agrega harç karışımlarından BT görüntüleri alınarak yoğunluk haritaları oluşturulmuştur. Böylece en küçük 1 mm çaptaki agregalar ve boşluklar görüntülenmiş ve 1 mm'den küçük çatlaklar da görüntülenebilmiştir. Beton içindeki donatının yoğunluğu ve yeri, gerideki harcın ve agreganın yoğunluğu kusursuz bir şekilde oluşturulmuştur. Boru ve kiriş gibi betonarme elemanlarda tekrarlı yüklemelerden sonra oluşabilecek deformasyonların ve kırılmaların analizi kolayca, düzgün ve düzenli bir şekilde yapılabileceği düşünülmüştür [50].

Chotard ve arkadaşları (2003), kalsiyum alüminat çimentosunun erken hidratasyon özelliğinin belirlenebilmesi için “BT” ve “Akustik Emisyon (AE)” sistemini kullanmışlardır. Bu iki tekniği de kullanarak, çimento hidratasyonunun erken safhalarındaki (karışımdan sonra birkaç dakikadan birkaç saate kadar) faz gelişimini izlemişlerdir. Sonuçlar s/ç oranı 0,33 olan kalsiyum alüminat çimento hamurunun 0 –

24 saatlik süreçteki hidratasyonu ile ilgilidir. Bu hidratasyon sürecinde, malzemede yayılma ses sinyalleri ve emilen x ışını değerleri kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. AE (=ses yayılma sinyalleri) ile BT verileri nicel olarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, her iki yöntemden alınan veriler karşılaştırıldığında, çimento hamurunun erken hidratasyon gelişiminin her iki yöntemde de birbirine yakın bağıntılar gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca çalışma sonunda, çimento hamurunun katılaşma sürecinde BT ve AE yöntemlerinin kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır [51].

Landis ve arkadaşları (2003), “X-Işını μ Tomografi” tekniği ile yüksek çözünürlüklü 3D tarama yapan cihazı kullanarak yükleme altındaki küçük silindir harçlarda oluşan iç çatlak gelişimini incelemiştir. BT taramalar aynı örnek için farklı yükleme artışlarında yapılmış olup, 3D görüntü analizi her yük artışı sırasındaki iç çatlak gelişimini ölçmek için kullanılmıştır. Ayrıca tekrarlı yükleme durumunda yük-deformasyon eğrisi kullanılmıştır. Oluşan iç çatlakların yüzey alanları ölçülmüş ve lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımlarıyla kırılma enerjisi hesaplanmıştır [53]. Landis ve arkadaşları (2006), bir diğer çalışmalarında betonda oluşan içsel çatlak oluşumu ve gelişimini “X-Işını μ BT” yöntemiyle ölçmüştür [54].

Landis ve Corr (2007), betonda kullanılan hava katkısının etkilerini μ BT kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Bu sebeple 4 farklı numune hazırlanmıştır. Numunelerde boşluk boyut dağılımı, hava kabarcıklarının faktörleri ve gözenekler arasındaki bağlantı ölçülmüştür. Bu ölçümlerin betondaki boşluk sistemine ait geleneksel varsayımlara meydan okuyacağı belirtilmiştir [55].

Helfen ve arkadaşları (2005), hidratasyon sırasında çimentonun mikro yapı gelişimini 3D görüntü tekniğini kullanarak incelemiştir. Bunun için katılaşma sonrası çimento yapısının gelişiminin gerçek zamanlı görüntülerini “ μ BT” kullanarak incelemiştir. μ BT ile çimentonun hidratasyonu sırasında biçimlenme etkileri, mikro çatlakların ileri gelişimleri ve otojen rötreyle ilişkili olan boşluklar 1 μ m hassasiyette gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı s/ç oranlarına sahip çimento hamurunun süreklilik gösteren boşluk hacminin oranı ve mikro porozitenin gelişimi belirlenmiştir [56].

Elaqra ve arkadaşları (2007), çimento harcında basınç yüklemesi sırasında oluşan hasar gelişiminin analizi üzerinde çalışmışlardır. Çimento harcındaki kum/çimento oranının hasar üzerindeki etkilerini “AE” ve “BT” kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmanın amacı, “BT” ve “AE” yöntemlerini kullanarak betonda basınç yüklemesi sırasında oluşan kırılma ve hasar sürecinin mekanizmasını açıklamaktır. BT’de farklı basınç yüklemeleri altındaki harç numunenin hasarları 3D görüntüleme yöntemi ile analiz edilmiştir. Kümülatif AE sonuçları kum/çimento oranına göre gerçek zamanlı hasar sürecinin gelişimi için kullanılmıştır. Sonuç olarak BT’nin harçlarda kırılma ve hasar gelişimi konusunda kullanılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca 3D analiz ile iç boşluk yapısında mezo ölçekte boşluk boyutu dağılımı ve gelişimi hakkında önemli bilgiler verdiği görülmüştür [57].

Saleh H.H. (2004), “X-Işını BT” tekniğini kullanarak betonun içyapısı üzerinde çalışmıştır. Çalışmada, betonun hava boşluğu yüzdesi, dağılımı, çatlak başlangıcı ve gelişimini ölçmek için bir deneysel metot tanımlanmıştır. Beton numunelerin hazırlığında üç değişken dikkate alınmıştır: hedef hava boşluğu, potasyum seviyesi ya da ince agreganın tipi. Örneklerden bazıları su içinde 1 yıla kadar bekletilmiştir. Bu süreçte genleşme miktarlarını ölçmek için kürden çıkarılmış ve BT ile görüntülenmiştir. BT görüntülerinin uzaysal çözünürlüğü 0,25 mm olup görüntü analizleri “ImagePro Plus” programı ile yapılmıştır. Analizlerde boşluk yüzdesi, dağılımı ve çatlak dağılımı belirlenmiştir. Bu sürecin adımları: uzunluk kalibrasyonu, eşik belirleme, nesne tanımlama ve otomatik alan hesaplama olarak uygulanmıştır. Sonuç olarak, boşluk yüzdesi ve dağılımı beton karışımındaki hava sürükleyici katkı miktarıyla orantılıdır. Çatlakların dağılımı numunede bulunan potasyum miktarı ile ilişkilidir. Silisyum içeren ince agregalarla hazırlanmış numunelerde önemli çatlaklar gözlenmiştir, fakat karbonat içeren ince agregalarla dökülmüş beton numunelerde çatlak görülmemiştir. Silindirik şeklindeki beton numunelerde çatlak alanları zamanla artmıştır. Ancak çatlak gelişimleri genleşme verileriyle ilişki göstermemektedir [58].

Wong ve Chau (2005), normal ve yüksek dayanımlı (tasarım basınç dayanımları 30 ve 90 Mpa olan) silindirik beton numuneleri üzerinde tek eksenli yükleme yapmışlardır. Yükleme sonrasında BT görüntülerinden malzemenin kırılma davranışı

ve mikro çatlak oluşumu hakkında bilgiler elde edilmiştir. Numunelerin ortalama hava miktarları MIP ile ölçülmüştür. Toplam 15 ay küre bırakıldıktan sonra, numuneler toplam basınç dayanımları üzerinden önce % 50 yükleme yapılmış ve sonrasında BT ile görüntülenmiştir. Sonrasında aynı numune % 85'i oranında yükleme yapıldıktan sonra BT ile görüntülenmiştir. Böylece, alınan görüntülerden örnekler içindeki hava kabarcıklarının gelişimi izlenmiştir. Kırılma sırasında, normal dayanımlı betonun mikro yapısında, yüksek dayanımlı betonun mikro yapısına göre çok farklı davranışlar oluşmuştur. Yüksek dayanımlı betonda hava kabarcıklarının artışı önemsizken, normal dayanımlı beton örneklerdeki hava kabarcıklarının gelişimi ve çekirdeklenmesi önemli bir durum oluşturmuştur. Ek olarak, BT görüntüleri üzerinde beton içindeki agregaların uzaysal dağılım haritaları oluşturulmuştur. Geleneksel yollarla üretilen numunelerde gerçek olmayan anizotropiye rastlanılmıştır. Ayrıca kullanılan betonların HU numaralarının 900 – 1800 arasında olduğu belirtilmiştir [60].

Boel ve arkadaşları (2006), çimentolu sistemlerin mikro yapı çalışmalarında X-Işını Tomografisinin potansiyelini keşfetmek üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, 10 μ çözünürlüğe sahip “ μ Tomografi” cihazı ile çimentolu sistemlerde hava-boşluk sisteminin görüntüleri üzerinde araştırma yapılmıştır [61].

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde kullanılan malzemeler, deney koşulları, numune hazırlığı ve kullanılacak deney yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

Çalışmada Set Italcementi Group Ankara Güvercinlik Çimento Fabrikasından temin edilen TS EN 197-1 [65] ve TS EN 197-2 [164] standartlarına uygun CEM I (PÇ 42,5R) ve TS 10157 [69] standardına uygun SRC (SDÇ 32,5) çimentoları kullanılmıştır. Çimentolar 50 kg torbalar halinde temin edilmiş ve aynı gün kullanılmıştır. Çimentoların kimyasal analizi (XRF) de yaptırılmış ve sonuçlar Çizelge 3.1’de verilmiştir.

3.1.2. Kum

Çalışmada, Set Italcementi Group Ankara Güvercinlik Çimento fabrikasından alınan TS EN 196-1’e göre [165] Rilem kumu adıyla da bilinen “Standart CEN Kumu” kullanılmıştır. Standart CEN kumunun kimyasal analiz (XRF) sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Kumun en büyük tane boyutu 2 mm olup genel kompozisyonunu silissi tanecikler oluşturmaktadır. Kumun özgül ağırlığı $2,56 \text{ kg/dm}^3$ olarak hesaplanmıştır.

3.1.3. Su

Çalışmada, karışım suyu olarak doğal kaynak suyu ve kür suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Kullanılan suların kimyasal analizleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM I, SRC çimentoları ve Standart CEN kumunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Oksit (%)	CEM I	SRC	Kum	Fiziksel Özellikler	CEM I	SRC
CaO	62,40	61,77	0,21	Kıvam (%)	28,8	25,8
SiO ₂	20,27	20,10	93,59	Yoğunluk (g/cm ³)	3,18	3,16
Al ₂ O ₃	5,38	4,16	2,01	Özgül yüzey (cm ² /g)	3262	3338
Fe ₂ O ₃	3,42	4,85	0,43	İncelik (%)	40 µm elek üstü	10,7
MgO	1,76	1,46	0,03			
SO ₃	2,77	2,50	0,08	90 µm elek üstü	0,7	2,2
K ₂ O	0,79	0,82	1,02			
Na ₂ O	0,02	0,08	0,60	Hacim genleşmesi (mm)	2	-
LOI	2,02	2,55	0,56	Priz Başlangıcı (dk)	140	175
SCaO	2,53	1,26	-			
C ₃ S	48,60	58,62	-	Priz Sonu (dk)	195	275
C ₃ A	8,47	2,82	-			

Çizelge 3.2. Kullanılan suların kimyasal özellikleri

Kimyasal içerik	Karışım suyu	Kür suyu	Kimyasal içerik	Karışım suyu	Kür suyu
Ca (mg/l)	19,7	28,6	pH	8,1	7,0-7,6
Mg (mg/l)	3,6	5,4	Fe (µg/l)	26	21
Al (µg/l)	-	32	Mn (µg/l)	-	-
NH ₄ (mg/l)	-	-	O ₂ (mg/l)	1,2	0,8
Cl ⁻ (mg/l)	1,2	4,4	SO ₄ (mg/l)	5,5	4,8
İletkenlik (µS/cm)	135	558-713	Na (mg/l)	3,8	11,2

3.1.4. Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat

Araştırmada sülfat etki mekanizmasını kısa sürede izleyebilmek amacıyla en agresif iki tip sülfat kullanılmıştır. Bu amaçla deneylerde ASTM C 1012 [131] ve ASTM C452'ye [130] göre %99,5 saflıkta Merck marka Magnezyum Sülfat (MgSO₄) ve SODAŞ A.Ş. Denizli Çardak Üretim tesislerinden temin edilen Sodyum Sülfat (Na₂SO₄) kullanılmıştır. Anhidrit haldeki Na₂SO₄ ve MgSO₄ plastik kaplarda muhafazalı olarak temin edilmiştir. Sülfatların kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Na₂SO₄ ve MgSO₄'ın özellikleri

Özellikler	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄
Molar kütle	142,04 g/mol	120,37 g/mol
Saflik derecesi	99,5% ≤	98,0 % ≤
Renk (%1'lik solüsyonda)	<10 klett	-
Rutubet ve LOI	≤ 0,3 % (105°C'deki kayıp)	≤ 2.0 % (600°C'deki kayıp)
pH	6,5 – 8,0 (%1'lik solüsyonda)	7,9 (50 g/l H ₂ O, 25°C)
Suda çözünmeyen madde	≤ 0,10 %	-
Su içinde çözünübilirliği	200 g/l (20 °C)	300 g/l (20 °C)
Yığın yoğunluğu	2,70 g/cm ³ (20 °C)	2,66 g/cm ³ (20 °C)
Demir (Fe)	≤ 10 ppm.	≤ 0,001 %
Krom (Cr)	≤ 1 ppm.	-
Chloride (Cl)	≤ 0,20 % (NaCl)	≤ 0,001 %
Kalsiyum (Ca)	-	≤ 0,04 %

3.2. Kullanılan yöntemler

Çalışmada CEM I ve SRC çimentoları ile hazırlanan standart harçlar üzerinde Na₂SO₄ ve MgSO₄ çözeltilerinin çeşitli fiziksel ve mekanik etkileri incelenmiştir. Bu sebeple boy uzama, hacimsel su emme, basınç dayanımı, SEM ve BT ile makro gözeneklerin gelişimi deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Araştırmada numune hazırlama aşamaları, çimentoların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, boy değişimi, su emme ve basınç dayanımı deneyleri Set Çimento Ankara Fabrikası Fizik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Fizik laboratuvarında sıcaklık 22 ± 2 °C ve bağıl nem %90-95 olarak sabitlenmiştir. Harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilen BT taramaları, Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyodiagnostik Anabilim Dalı'ndaki BT laboratuvarında yapılmıştır.

3.2.1. Çimento deneyleri

Normal kıvam tayini deneyi

Kıvam tayini deneyi, TS EN 196-3'e [166] göre yapılmıştır. Kıvam tayini deneyi sonuçları 3 ayrı numunenin aritmetik ortalaması olarak Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Priz süresi deneyi

Priz süresi deneyi, TS EN 196–3 standardına göre yapılmıştır. Priz süresi deney sonuçları her bir çimento tipi için 3 ayrı numunenin aritmetik ortalaması olarak Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Hacim genleşmesi deneyi

Hacim genleşmesi deneyi, TS EN 196-3’e göre standart kıvama sahip çimento hamurları ile yapılmıştır. Deneyden elde edilen A ve C değerlerinden yararlanılarak toplam genleşme “Eş. 3.1” ile belirlenmiştir. Deney sonuçları 3 ayrı deneyin aritmetik ortalaması olarak Çizelge 3.1’de verilmiştir.

$$\text{Toplam hacim genleşmesi} = C - A \quad (3.1)$$

3.2.2. Çimento harç çubuklarının hazırlanışı ve boy değişimi (genleşme) deneyi

Çimento harç çubuklarının malzeme miktarları TS EN 196-1’e göre belirlenmiştir. Buna göre hazırlanan çimento harç çubuklarında 450 g çimento, 1350 ± 50 g standart CEN kumu ve 225 ml karışım suyu kullanılmıştır. Burada amaç diğer analiz yöntemleri ile aynı tip ve aynı malzeme oranına sahip harç numunelerden elde edilecek sonuçları karşılaştırabilmektir. Çimento harç çubukları ASTM C157 [167] ve ASTM C 490 [168] standardında belirtilen boyutlarda hazırlanmıştır. Bunun için öncelikle 25x25x285 mm boyutlarında 2 gözlü çelik kalıpların içlerine vidalar takılmış ve kalıplar zeytinyağı ile ince bir tabaka halinde yağlanmıştır. Harç karışımı için malzemeler hazırlandıktan sonra TS EN 196-1’e göre harç numuneleri üretilmiştir.

Harç numunelerin üzerine Çizelge 3.4’te tanımlanan referans numaraları yazıldıktan sonra harç çubuklar doygun kireç çözeltisine dik olarak daldırılmıştır. Boy uzama deneylerinde kullanılmak üzere her bir numune grubundan toplam 6 harç çubuk

üretimiştir. Harç çubukların boyları ölçüldükten sonra ASTM C1012'ye göre "Eş. 3.2" kullanılarak numunelerin boy değışimleri belirlenmiştir.

$$\Delta L = \frac{L_x - L_y}{L_g} \times 100 \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte

ΔL : x yağındaki numunenin % olarak boy değışimi,

L_x : x yağındaki numunenin referans çubuğına göre komparatör okuma değeri,

L_i : Numunenin referans çubuğına göre ilk komparatör okuma değeri,

L_g : Nominal numune uzunluğu, ya da 250 mm

Çizelge 3.4. Boy uzama harç numunelerinin referans numaraları

Çimento tipi	Kür Koşulu	Referans numaraları					
CEM I	Su	PSU 1	PSU 2	PSU 3	PSU 4	PSU 5	PSU 6
	Na ₂ SO ₄	PNU 1	PNU 2	PNU 3	PNU 4	PNU 5	PNU 6
	MgSO ₄	PMU 1	PMU 2	PMU 3	PMU 4	PMU 5	PMU 6
SRC	Su	SSU 1	SSU 2	SSU 3	SSU 4	SSU 5	SSU 6
	Na ₂ SO ₄	SNU 1	SNU 2	SNU 3	SNU 4	SNU 5	SNU 6
	MgSO ₄	SMU 1	SMU 2	SMU 3	SMU 4	SMU 5	SMU 6

Çizelge 3.4'te referans numaralamada ilk harf çimento tipini (P: CEM I, S: SRC), ikinci harf kürü (S: Su, N: Na₂SO₄, M: MgSO₄), üçüncü harf deney metodunu (U: Boy uzama deneyi) tanımlamıştır.

ASTM C 1012'ye göre standart çimento harçları 20 MPa basınç dayanımına ulaşınca kadar kirece doygün çözelti içinde bekletilmelidir. Bu sebeple 24 sa arayla harç numunelerden en az 2 adedi üzerinde basınç dayanımı deneyi yapılarak 20 MPa basınç dayanımına ulaşılana kadar deney tekrar edilmelidir [131]. Bu amaçla boy uzama numuneleri ile birlikte aynı gün CEM I ve SRC çimentoları ile TS EN 196-1'e göre 12'şer adet 40x40x160 mm boyutlarında harç numunesi hazırlanmıştır. Standart çimento harçlarının hazırlığında boy değışimi numuneleri ile aynı uygulama takip edilmiştir. Çimento harç numuneleri bir gün süreyle kür dolabında

bekletildikten sonra, boy değişimi harç çubukları ile birlikte doymun kireç çözeltisi içine batırılmıştır. 24 sa sonra her bir deney grubundan 2 adedi önce eğilmede çekme dayanımı cihazında kırılarak iki parçaya ayrılmıştır. Elde edilen 4 parça numune ile basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Numunelerin basınç dayanımları 20 MPa olduğunda, (CEM I çimentosuyla hazırlanan numuneler 48 sa sonra, SRC çimentosuyla hazırlanan numuneler 72 saat sonra 20 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır.) numuneler doymun kireç çözeltisinden çıkarılıp kür dolabındaki şehir şebeke suyu, % 5 derişime sahip Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltileri bulunan kapların içine konulmuştur. Çimento harç çubukları yüksekliğı 70 cm olan plastik kaplarda kapağın alt kısmında hazırlanan bir düzeneğe asılı bir şekilde tutturularak ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Numuneler 490 gün süreyle su, % 5 derişime sahip Na_2SO_4 çözeltisi ve % 5 derişime sahip MgSO_4 çözeltisinde bekletilmiştir. Bu süreç içinde sülfat çözeltileri ve su içinde bekleyen boy uzama numunelerinden ASTM C1012-95'e göre 0, 7, 14, 21, 56, 91, 133, 154, 182, 203, 238, 301, 336, 350, 385 ve 490 gün yaşlarında boy değişimi çerçevesiyle genleşme değerleri ölçülmüştür.

Sülfat çözeltilerinin hazırlanması

%5 derişime sahip sülfat çözeltileri ASTM 1012-95'e [131] göre hazırlanmıştır. Buna göre 50'şer g Na_2SO_4 ve MgSO_4 kimyasalları ayrı kaplarda 900 ml su içinde çözdürüldükten sonra çözeltiler 1000 ml'ye tamamlanarak % 5 derişime sahip çözeltiler oluşturulmuştur. Na_2SO_4 ve MgSO_4 kimyasallarının suda daha kolay ve daha çok oranda çözülebilmesi için yaklaşık olarak 30-35 °C sıcaklığa ihtiyaç vardır [25]. Bu nedenle Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltisini hazırlamak amacıyla öncelikle kür suyu ısıtılmış ve ardından kimyasallar su içinde karıştırılarak tamamen çözülmesi sağlanmıştır. Ardından hazırlanan çözeltilerin üstü kullanılmadan önce örtülerek ortam sıcaklığına gelmeleri için beklenmiştir. Çözelti hacmi numune hacminin 4 katını aşmayacak şekilde hesaplanarak kaplardaki çözelti miktarları ayarlanmıştır. Numuneler çözeltilere daldırılmadan önce pH değerleri ölçülmüştür, pH değerleri 7–8 arasında olması durumunda numuneler hazırlanan çözeltiler içine daldırılmıştır.

Literatürde sülfat etkileri ve hasar oluşma süresinin pH dengesiyle yakından ilişkili olduğu belirtilmektedir. Bu kapsamda çalışmanın sonuçlarını daha hızlı alabilmek amacıyla çözeltiler belirli süreçlerde tazelenmiştir. Bu sebeple içinde numunelerin bulunduğu çözeltiler sabit pH değerine ulaşmaya kadar kullanılmıştır. Sabit pH değerlerine ulaşıldığında 1 hafta içinde sülfat çözeltileri tazelenmiştir. Böylece sülfat çözeltilerinin agresif etkileri pH değeri de dikkate alınarak hızlandırılmaya çalışılmıştır.

3.2.3. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneylerini gerçekleştirmek amacıyla TS EN 196-1'e göre her deney grubundan 4'er adet olmak üzere 40x40x160 mm boyutlarında standart harç numuneleri hazırlanmıştır. Numune hazırlığında boy uzama deneyi için hazırlanan çimento harç çubukları ile aynı işlem takip edilmiştir. Bu nedenle iki grup CEM I ve SRC çimentoları içeren harç numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan harç numuneler 22 ± 2 °C sıcaklık ve ~% 94 nem oranına sahip kür dolabına 24 sa süreyle küre bırakılmıştır. 24 sa sonunda kalıplarından çıkarılan numunelere referans numaraları yazılmış ve kür dolabına şehir şebeke suyu, Na₂SO₄ çözeltisi ve MgSO₄ çözeltisi içine yerleştirilmiştir. Bu numunelerin referans numaraları Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Basınç dayanımı deney numunelerinin referans numaraları

Çimento tipi	Kür Koşulu	Referans numaraları			
CEM I	Su	PSB X1	PSB X2	PSB X3	PSB X4
	Na ₂ SO ₄	PNB X1	PNB X2	PNB X3	PNB X4
	MgSO ₄	PMB X1	PMB X2	PMB X3	PMB X4
SRC	Su	SSB X1	SSB X2	SSB X3	SSB X4
	Na ₂ SO ₄	SNB X1	SNB X2	SNB X3	SNB X4
	MgSO ₄	SMB X1	SMB X2	SMB X3	SMB X4

Çizelge 3.5'te referans numaralarındaki ilk harf çimento tipini (P:CEM I, S: SRC), ikinci harf kür tipini (S: Su kürü, N: Na₂SO₄ kürü, M: MgSO₄ kürü), üçüncü harf deney metodunu (B: Basınç dayanımı deneyi), dördüncü harf numunenin basınç

dayanımı uygulanacağı yaşı (X: Gün yaşı), rakamla gösterilen ise numune sayısı olarak tanımlanmıştır.

Basınç dayanımı deneyi için 36 çelik kalıp içinde toplam 108 adet numune hazırlanmıştır. Harç numunelerin 54 tanesi CEM I çimentosuyla, diğer 54 adedi SRC çimentosu ile üretilmiştir. Böylece her farklı kür için 40x40x160 mm boyutlarında 18 numune elde edilmiştir. Harç numuneleri üzerinde sadece basınç dayanımı deneyi yapılacağı düşünülerek numuneler 40x40x48 mm boyutlarında üç parça halinde kesilmiştir. Kesme işlemi için 4 mm kalınlığındaki elmas uçlu testereye sahip taşınabilir kesici kullanılmıştır.

Taşınabilir elmas uçlu kesici ile 40x40x48 mm boyutlara indirgenen harç numuneler %5 sülfat çözeltisi içeren ortamlara yerleştirilmeden önce ASTM C1012'ye göre [131]; 20 MPa basınç dayanımına ulaşana kadar kirece doygun çözelti içerisinde bekletilmiştir. CEM I çimentosuyla hazırlanan numuneler 2 gün yaşında, SRC çimentosuyla hazırlanan numuneler 3 gün yaşında kirece doygun çözelti içinden çıkarıldıktan sonra % 5 derişime sahip $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltileri içine konulmuştur. Kontrol grubu harç numuneler de kirece doygun çözelti içinden çıkarıldıktan sonra sülfat çözeltilerinin hazırlandığı suyla aynı karakterdeki su içerisine küre bırakılmıştır. Basınç dayanımı deneylerinde her bir grup için 4'er adet numune kullanılmıştır.

Harç numuneleri 2, 7, 14, 21, 28, 70, 90, 120, 150, 180, 270, 360 ve 560 gün yaşlarında kürden çıkarıldıktan sonra 1 sa süreyle yüzey kurusu hale gelmesi için beklenmiştir. Ardından Atom Teknik markalı 20 ton kapasiteli tek eksenli preste kırılarak 2,4 N/s yük altında basınç dayanımları ölçülmüştür.

Sonuç çizelgelerinde her bir çimento tipi için referans numuneler temel alınarak sülfata maruz harçların kendi grupları içinde dayanım gelişimleri yüzdesel olarak ifade edilmiştir. Referans numuneler su içinde bekleyenler olup, temel alınan basınç dayanımı değeri su içinde bekletilen ve 28 gün yaşında basınç dayanımı deneyine tabi tutulan numunelerdir. Gelişim yüzdeleri, her bir süreçte elde edilen basınç

dayanımı deney sonucunun aynı tip çimento harcının su içinde kür yapılan 28 gün sonundaki basınç dayanımı deney sonucuna bölümünün 100 ile çarpılması ile elde edilmiştir. Eşitlik basit olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Gelişim (\%) = 100 \times \frac{X \text{ gün yaşında basınç dayanımı deney sonucu } \left(\frac{N}{mm^2} \right)}{28 \text{ gün yaşında basınç dayanımı deney sonucu } \left(\frac{N}{mm^2} \right)} \quad (3.3)$$

3.2.4. Su emme deneyi

Su emme deneyi TS 3624'e göre [169] gerçekleştirilmiştir. Ancak standartta belirtilen kaynatma uygulaması yapılmamıştır. Ayrıca diğer deney numunelerinde oluşacak sülfat atağı etkilerinin, su emme deney numunelerinde oluşacak etkilerle karşılaştırmalarının yapılabilmesi için numunelere kaynatma uygulanmamıştır. Ancak sülfat çözeltileri ve su içinde bekletilen numuneler sabit ağırlığa gelinceye kadar ağırlık ölçümleri yapılmamıştır. Bu amaçla 72 saatte bir hassas terazide ağırlık ölçümleri yapılmış ve aynı ağırlık değeri 2 defa ölçüldüğünde elde edilen ikinci ölçüm değeri hesapta kullanılmıştır. Su emme deneylerinde kullanılmak üzere TS EN 196-1'e göre 40x40x160 mm boyutlarında standart çimento harçları hazırlanmıştır. Numune hazırlığında basınç dayanımı deney numunelerini hazırlamada kullanılan işlemler takip edilmiştir.

Çizelge 3.6. Su emme deneylerinde kullanılacak numunelerin referans numaraları

Çimento Tipi	Kür Koşulu	Referans numaraları			
PÇ 42,5R	Su	PSS X1	PSS X2	PSS X3	PSS X4
	Na ₂ SO ₄	PNS X1	PNS X2	PNS X3	PNS X4
	MgSO ₄	PMS X1	PMS X2	PMS X3	PMS X4
SDÇ 32,5	Su	SSS X1	SSS X2	SSS X3	SSS X4
	Na ₂ SO ₄	SNS X1	SNS X2	SNS X3	SNS X4
	MgSO ₄	SMS X1	SMS X2	SMS X3	SMS X4

Çizelge 3.6'da referans numaraları gösterilen her bir deney grubu için 40x40x48 mm boyutlarında 4'er adet numune hazırlanmıştır. Deneyde takip edilen işlemler şöyledir: sülfat çözeltilerinde ve su içinde bekletilen numuneler öncelikle ağırlıkları

0,01 g hassasiyete sahip bir tartı kullanılarak tartılmıştır (A). Daha sonra numuneler özgül ağırlık sehпасındaki asma aparatlı tartıya asılarak su içine daldırılmış ve tekrar ağırlığı su içinde tartılarak belirlenmiştir (B). Son olarak numuneler etüve yerleştirilerek 105 °C sıcaklıkta 24 saat süreyle bekletilmiştir. 24 saat sonunda etüvden alınan numuneler desikatör içinde soğumaları için beklenmiştir. Soğuyan numuneler tekrar tartılarak ağırlıkları belirlenmiştir (C). TS 3624'e göre "Eş. 3.4-3.7" kullanılarak numunelere ait özellikler belirlenmiştir.

$$\text{Ağırlıkça Su Emme Oranı (\%)} : m_1 = 100 \times (B-A)/A \quad (3.4)$$

$$\text{Kuru özgül Ağırlık (kg/dm}^3\text{)} : S_k = A/(B-C) \quad (3.5)$$

$$\text{Görünür Özgül Ağırlık (kg/dm}^3\text{)} : S_g = A/(A-C) \quad (3.6)$$

$$\text{Görünür Boşluk Oranı (\%)} : B_0 = 100 \times (B-A)/(B-C) \quad (3.7)$$

3.2.5. Kapiler su emme deneyi

Kapiler su emme deneyi TS 4045'e [170] göre yapılmıştır. Deneyde TS EN 196-1'e göre 40x40x160 mm boyutlarındaki standart harç numuneler kullanılmıştır. Örneklerin başlangıçtaki sabit ağırlıklarına göre, ağırlık farkları dikkate alınarak kapiler su emme değerleri hesaplanmıştır [170]. Standartta belirtildiği gibi kapiler su emme-zaman eğrisi lineerlikten çıktığı andaki ağırlık farkı dikkate alınarak "Eş. 3.8"dan faydalanarak kapiler su emme değerleri hesaplanmıştır [171]. Ancak kapiler su emme değerleri lineer olmadığı durumlarda "Eş. 3.9"den faydalanılmıştır [170].

$$K = \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \cdot t \quad (3.8)$$

K: Kapilarite katsayısı (cm²/s) Q: Emilen su miktarı

A: Alan (cm²) t: Su emme süresi (s)

$$m = \frac{g_2 - g_1}{4.9} \text{ (kg/m}^2\text{)} \quad (3.9)$$

m = Kapiler su emme miktarı, (kg/m²h^{0.5})

$$g_t = \frac{\text{Numunenin ilk ağırlığı (kg)}}{\text{Numunenin suya değen yüzey alanı (m}^2\text{)}} \quad (3.10)$$

$$g_s = \frac{\text{Numunenin son ağırlığı (kg)}}{\text{Numunenin suya değen yüzey alanı (m}^2\text{)}} \quad (3.11)$$

Kapiler su emme deney numunelerinin referans numaraları Çizelge 3.7’de verilmiştir. Kapiler su emme deneyleri Aynı harç numuneler üzerinde 2, 28, 180 ve 270 gün yaşlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde her bir grup için 4’er harç numune kullanılmıştır.

Çizelge 3.7. Kapiler su emme deneylerinde kullanılacak numunelerin referans numaraları

Çimento Tipi	Kür Koşulu	Referans numaraları			
PÇ 42,5R	Su	PSK 1	PSK 2	PSK 3	PSK 4
	Na ₂ SO ₄	PNK 1	PNK 2	PNK 3	PNK 4
	MgSO ₄	PMK 1	PMK 2	PMK 3	PMK 4
SDÇ 32,5	Su	SSK 1	SSK 2	SSK 3	SSK 4
	Na ₂ SO ₄	SNK 1	SNK 2	SNK 3	SNK 4
	MgSO ₄	SMK 1	SMK 2	SMK 3	SMK 4

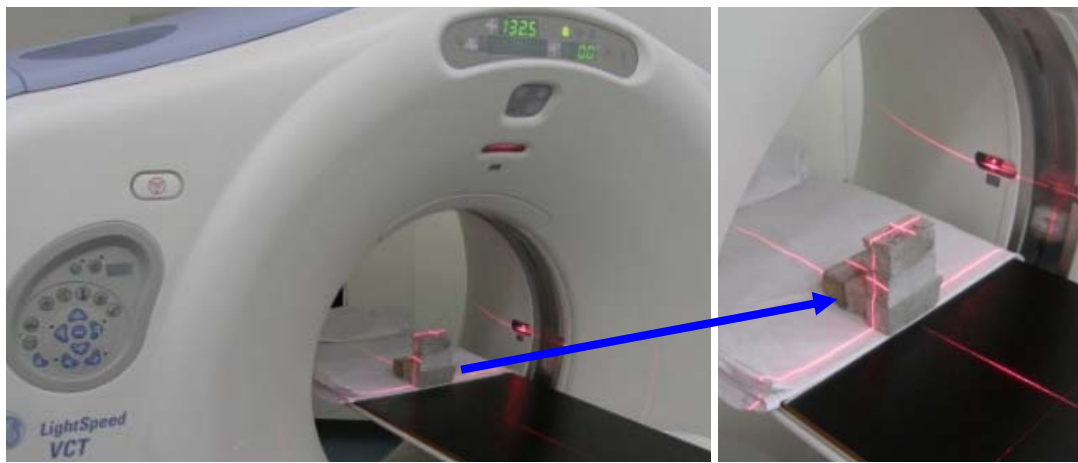
3.2.6. BT ile hava boşluklarının belirlenmesi deneyleri

Araştırmada General Electric (GE) Lightspeed scan VCTi model 3. nesil matrix detektör takımına sahip bir BT kullanılmıştır. Kullanılan BT sisteminin özellikleri Çizelge 3.8’de özetlenmiştir.

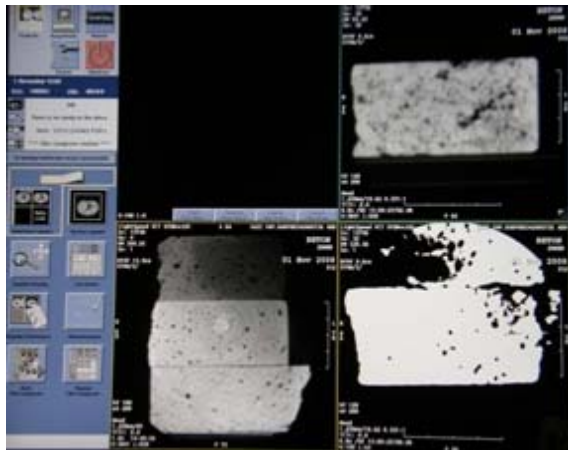
Çizelge 3.8. GE marka Lightspeed VCTi model BT sisteminin özellikleri [174]

Parça	Özellik	Parça	Özellik
Detektör takımı	Matrix dedektör	Tarama yöntemi	Axial ve Helikal
Detektör boyutları	16x1,25 mm (20 mm) / 16 kanal	Görüntü oluşturma	Enterpolasyon sonrası Filtered back projection
Toplam kanal sayısı	912 kanal	Enerji seviyeleri	80 kV, 100 kV, 120 kV ve 140 kV
Piksel bit derinliği	4096	Tüp akımı	0 – 850 mA
BT değer aralığı	-1024 ile +3072 arasında	Filament	Small ve Large filament

Sistem üzerinde hava ile kalibrasyon işlemleri yapıldıktan sonra numuneler üzerinden görüntüleme yapılmıştır. Ancak BT ünitesinde görüntü kalitesi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörleri inceleyip artefakt oranını en aza indiren kombinasyonu bulmak amacıyla numuneler üzerinde birtakım ön görüntülemeler yapılmıştır. Bu amaçla TS EN 196-1'e göre standart harç numuneleri hazırlanmış ve eğilme presinde iki parçaya ayrıldıktan sonra BT gantrisine Resim 3.1'de görüldüğü gibi yerleştirilmiş ve taramalar gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.1.a. Harç numunelerin VCTi model BT'de yerleştirilmesi



Resim 3.1. b. Harç numunelerin VCTi model BT'de görüntülenmesi sonucunda elde edilen resim

Resim 3.1.a ve Resim 3.1.b'de gösterilen ön çalışma 96 mm ve 150 mm olmak üzere iki farklı FOV (Field of View= Görüntüleme alanı) kullanılmıştır. 80, 100, 120 ve

140 keV enerji düzeylerinde, 200 mA ve 400 mA akım ile 0,625 mm ve 1,25 mm kesit kalınlığında taramalar gerçekleştirilmiştir. Görüntü oluşturmada “edge” ve “standart recon” kullanılarak kombine taramalar halinde yapılmıştır. Taramalar sonucunda Ek-1’de bir kısmının verildiği toplamda 1537 kesit görüntü elde edilmiştir. Görüntüler, “Matlab” ve “3D Doctor” programlarında numunelerdeki HU değerleri ve artefakt oluşumları açısından değerlendirilmiştir. Ek-1’de verilen görüntülerde de görüldüğü gibi 1,25 mm kesit kalınlığında taranan görüntülerde malzeme ile boşluklar arasındaki geçişlerin çok net olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin parsiyel hacim etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu etkiyi azaltmak için daha küçük kesit kalınlıklarındaki taramaların kullanılması gerektiği kaynaklarda belirtilmiştir [148, 149].

Ön çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, BT taramaları yüksek enerji düzeylerinde yapıldığında artefakt oluşumunun azaldığı ancak numuneye verilen radyasyon etkisinin arttığı belirlenmiştir. Bu bilgiye dayanılarak numunelerin radyasyon etkilerinden en az etkilenmeleri ve bu arada en az artefakt oluşumuna sebep olacak enerji seviyesi tahmini olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra literatürde beton numuneler üzerinde en çok kullanılan enerji seviyeleri de göz önüne alınmıştır [60]. Bu çerçevede tez çalışmasına ait harç numunelerin BT taramalarının 120 keV enerji düzeyinde 400 mA konfigürasyonunda yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca “3D Doctor v.4.0.2008” ve “Matlab v.2010b” programında hazırlanmış bir görüntü işleme yazılımıyla numunenin BT resimleri değerlendirilmiş ve asıl çalışma için en uygun görüntüleme tekniği seçilmiştir. Buna göre BT’de görüntüleme (tarama) ayarları Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. BT tarama ayarları

Parametre	Tarama Seçeneği	Parametre	Tarama Seçeneği
Tarama seçeneği	Axial Mode	X-ışını tüp akımı	400 mA
Enerji seviyesi (Peak)	120 kV	Filtre tipi	Medium Filter
Kesit kalınlığı	0,625 mm	Focal Spot	1,2 s
Görüntüleme alanı	96,0 mm	Piksel aralıkları	0,1875x0,1875 mm
Ekspozür süresi	1000 ms	Piksel matriksi	512x512

Matlab görüntü analiz programının analizlerde kullanımı

Çimento harç numunelerinden elde edilen BT görüntüleri Tıp biliminde kullanılan tomografi görüntüleri gibi DICOM (Digital Imaging and Communication of Medicine) formatlı resim dosyalarıdır. Bu dosyalar 512 x 512 piksel boyuta sahip olup 16 bit renk derinliğine sahiptir. Yani bir tomografide (kesit görüntü) $512 \times 512 = 262144$ adet piksel ve 4096 renk bulunmaktadır. Her piksel için bir HU değeri oluşturulmaktadır. HU değerleri taranan malzemenin yoğunluğuna ve atom sayısına bağlıdır. Bilgisayar kesit görüntüyü oluştururken her bir piksel için yoğunluk değeri ataması yapar. Bu yoğunluk değerleri her bir pikselde bir renk oluşturur. Bu sebeple kesit görüntülerde siyah ile beyaz arasında kalan tonlar görüntülenmektedir. Kesit görüntülerde maddenin yoğunluğu arttıkça beyaza yaklaşmakta dolayısıyla HU değeri artmaktadır. Maddenin yoğunluğu azaldıkça o bölge siyaha yaklaşmakta dolayısıyla HU değeri azalmaktadır. Bir röntgen filminde olduğu gibi kemik doku beyaz, yumuşak doku gri ve hava boşlukları siyah görülmektedir. Aruntaş ve diğerleri yaptıkları çalışmada çimento harcında kullanılan malzemelerin HU değer aralıklarını incelemişlerdir. Çalışmada 3 gün yaşındaki çimento hamuru 1575–1887 HU değerindeyken, toz haldeki çimento 890–1180 HU, kuru halde kum 579–1119 ve ıslak halde kum 1071–1467 HU değerleri aralığında aldığı belirlenmiştir [45]. Başka bir çalışmada Wong ve Chau beton için 900–1800 HU aralığında bir değer tanımlamışlardır [60].

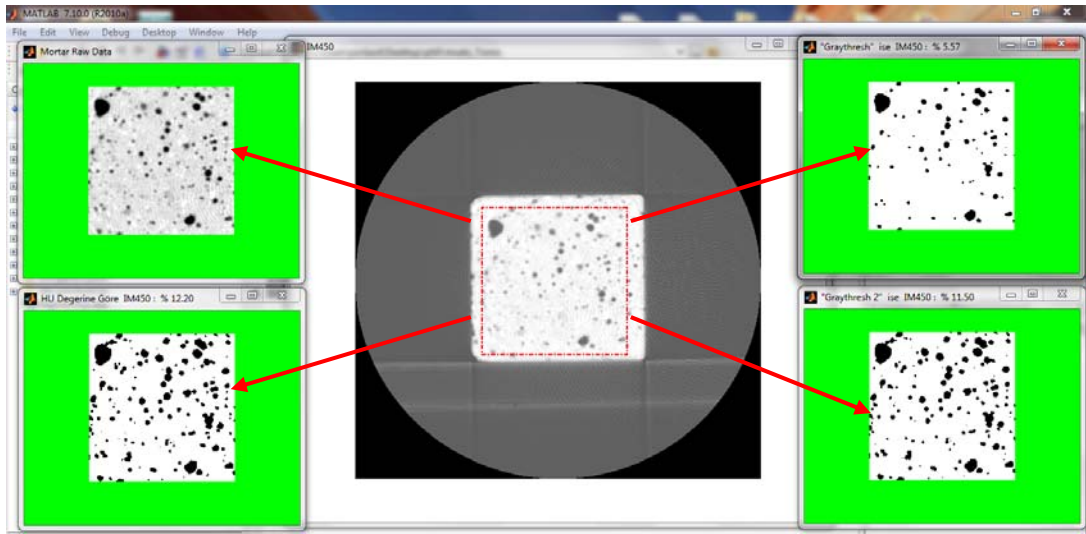
16 bitlik resim oluşturan kesit görüntülerde siyah ile beyaz arasında toplam 4096 HU değeri vardır. Bu değerler madde için farklı yoğunluklara göre derecelenmiştir. Çimento harçlarında hava boşlukları, sıvı ile tam dolu ya da yarı dolu boşluklar, kum ve sertleşmiş çimento bir arada bulunmaktadır [45, 172]. Betonun ve çimento harcının heterojen yapısı ve BT taramaları sonucunda oluşan parsiyel hacim etkisi sebebiyle kesit görüntülerde malzemelerin birbirinden ayrıştırılması oldukça zordur. Ancak sayısal işleme yapan bazı bilgisayar yazılımları ile heterojen malzemelerden az yoğunlukta olan boşlukları ya da yoğunluğu en yüksek olan katı kısımları ayrıştırmak mümkün olabilmektedir. Bu tip yazılımlardan bazıları Matlab, Tomoscan, 3D Doctor, ImageJ olarak sayılabilir. Bu tip programlar DICOM formatlı

tomografi resminin alt yapısındaki matrislerden yararlanarak çalışmaktadır. Matrisler HU değerlerinden ibarettirler. Böylece bu sayılar arasından belirli yoğunluk aralıkları tanımlanarak, tanımlanan alana ait matematiksel bilgiye ulaşılabilmektedir [156].

Bu çalışmada görüntü analiz programı olarak Birgül (2008) tarafından bir araştırmada denenmiş ve literatüre geçmiş [173] olan Matlab ile hazırlanmış program üzerinde çeşitli düzenlemeler yapıldıktan sonra çalışmada kullanılmıştır. Programın kısa algoritması şu şekildedir: Öncelikle DICOM uzantılı kesit görüntüler programda fonksiyonlarla tanımlanarak görüntülenmiştir. Kesit görüntülerdeki harç numunenin kenarlarından yaklaşık 5 mm uzaklığında kırmızı kesikli bir çizgi çizdirilerek hesap yapılacak ilgili alan (ROI: Region of interest) belirlenmiştir (Şekil 3.1). Ardından kesit görüntüde gözenek için “Graytresh” (=görüntüde gri kontrastın ani değişim aralığı) değeri için programda “0” değeri girilerek, bu alan için boşluk tanımlaması yapılmıştır. Katı kısım “Graytresh” değeri için programda “1” değeri girilerek, bu alan katı kısım olarak tanımlanmıştır.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi standart çimento harcındaki boşluklar siyah, katı kısımlar beyaz olarak görülmektedir. Bu aşamadan sonraki işlem siyah alanların sınırlarını belirleyerek alanları piksel bazında hesaplatmaktır. Piksel olarak elde edilen toplam boşluk alanları yine programın kalibrasyon verisinde görüntülenen pikselin mm cinsinden değeri ile cebirsel olarak çarpılarak alan verisi mm²’ye dönüştürülmüştür. Sonrasında elde edilen değer toplam kesit alanına bölünerek yüzde şeklinde porozite olarak ifade edilmiştir. Şekil 3.1’de makro boşlukların görüntülenmesi ve boşluk oranının hesaplanması için Matlab ile hazırlanan programın çalışma prensibini tanımlayan bir görüntü verilmiştir. Resmin ortasında bulunan görüntü çimento harç numunesinden taranan bir tomografidir. Bu kesit görüntü ham verilerden oluşmaktadır ve -1024 HU ile +3071 HU aralığındaki veri tanımlaması yapılmamıştır. Şekil 3.1’nin sol üst köşesindeki kesit görüntü, ortadaki ham resmin kesikli bir çizgi olarak ROI ile çizilmiş çizgi içinde kalan ve hesaplamada kullanılacak alandır. Bu görüntü -1024 HU ile +3071 HU aralığında tanımlanmış görüntüdür. Şeklin sol ve sağ alt ile sağ üst köşesindeki görüntüler resmin sol üstünde görüntülenmiş alanın iki değerle (1 ve 0) tanımlanmış resimleridir. Bu

resimlerde siyahla tanımlanmış alanlar boşlukları, beyazla tanımlanan alan katı kısmı simgelemektedir. Resmin sol alt köşesindeki görüntüde boşluk alanları araştırmacı tarafından tanımlanmaktadır. Resmin sağında üst ve alt görüntülerde Matlab programında “graytresh” fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Tez çalışmasında BT ile taranan numunelerden elde edilen makro boşluk oranları ile ilgili veriler sol alt köşedeki ve sağ alt köşedeki HU değerine göre belirlenmiştir.



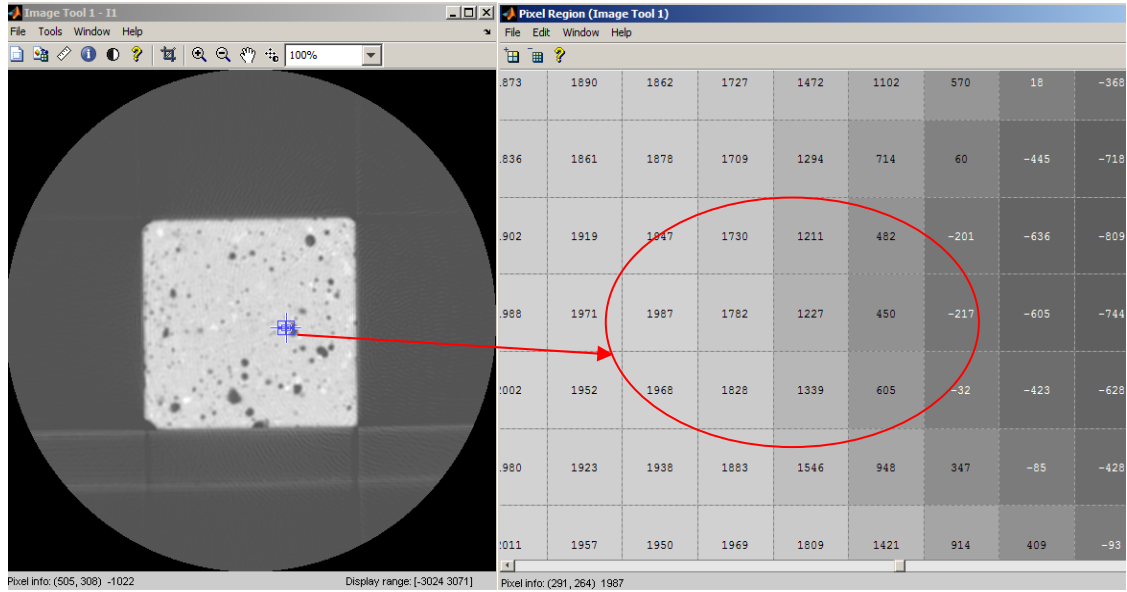
Şekil 3.1. Matlab programında tomografilerin incelenme ara yüz görüntüsü

Çimento harçlarında oluşan boşlukları kesit görüntüde tanımlamak için iki farklı değerlendirme yapılmıştır. Değerlendirmelerden ilki su emme deney sonuçlarıdır. 28 gün yaşındaki çimento harçlarının ortalama görünür boşluk oranları yaklaşık %15 olarak belirlenmiştir. Bu ortalama değer dikkate alınarak bir üst eşik HU değeri kabul edilmiştir. Diğer değerlendirmede kısmi hacim etkisi dikkate alınmıştır. Bu yaklaşımda çimento harcının tomografisinde matlab programı yardımıyla katı kısımlarla boşluk arayüz geçiş matrisi değerlendirilmiştir. Boşlukların HU değer aralıkları Matlab programında “pixelregion” araç kutusu kullanılarak ve Birgül’ün (2008) [173] yapmış olduğu çalışmada kullanılan metoda dayanılarak belirlenmiştir. Bu metoda göre çimento harcının bir tomografi kesitinde hava boşluğundan katı kısma geçişinde HU değerlerinde ani bir artış olmaktadır. Bu artışın sebebi öncelikle yoğunluk farkından kaynaklanmaktadır. Ancak BT’de tarama sırasında x ışını çok

yoğun bir hacimden, yoğunluğu çok düşük bir voksel hacmine geçerken kısmi hacim etkisi denilen bir hata oluşur [163]. Bu hata yoğun ortam HU değerleri ile az yoğun olan ortamdaki HU değerlerinin geçiş pikselleri arasında yumuşak bir geçiş oluşmasını sağlar. X-ışınının geçtiği hacimde yoğunluğu farklı olan pikseller olabilir. Böyle bir durumda da kısmi hacim etkisi ile x ışınının taradığı farklı yoğunluklara sahip hacmin HU numarası ortalama bir değerle nitelenir [156]. Bir harç numunesinin tomografi kesitinde gözenek-katı faz ara yüz geçişi HU değerleri Şekil 3.2’de Matlab programı kullanılarak gösterilmiştir. Şekildeki kesit görüntü 2 gün yaşında PMT 1 numaralı harç numuneye aittir.

Şekil 3.2’deki kesit görüntüde harç içinde bulunan bir hava boşluğu-katı faz geçişi piksel haritası olarak görüntülenmiştir. Tomografi üstündeki artı şeklindeki işaret görüntülemek istenen alanın seçilmesini sağlayan bir ikondur. Kesit görüntülerde daha önce de bahsedildiği gibi yoğun olan alanlar beyaza yakın renkle, hava boşlukları siyah renkle tanımlanmıştır. Bu 2 boyutlu röntgen filmlerinde olduğu gibidir. Bu sebeple Şekil 3.2 incelendiğinde siyah renkle görülen alanlar boşluğu ifade etmekte ve HU değerleri negatif değerler almaktadır. Siyah renkten griye geçiş piksellerinde HU değerleri yüksek derecede artmaktadır. Şekildeki daire ile çizilmiş alan dikkate alınırsa; sırasıyla sola doğru (gözenekten katı kısma) -605, -217, 450, 1227, 1782, 1987, 1971 ve 1988 gibi değerler görülmektedir. 1782 değerinden sonraki değerler birbirine yakın değerlerdir. Ayrıca yine diğer gözeneklerde de aynı durum incelendiğinde 1200 HU değerlerinden ~1800 HU değerlerine geçiş söz konusudur. O halde 1750 – 1800 HU değerinden büyük değerlerdeki bu alanlar katı alanları sembolize etmektedir. Bu artış ancak yoğun yapıya geçişin bir ifadesi olabilir. Şekil 3.2’de çemberle çizilmiş alan hava boşluğundan katı faza geçiş kısmıdır. Bu ani kontrast değişiminin HU değerlerine bağlılığı sebebiyle bir eşik değeri bulabilmek amacıyla ayrı bir analiz yapılmış ve bölüm 4.5’te açıklanmıştır. Sonuç olarak Matlab programında eşik değerinin altında kalan bu değer aralıkları tanımlanarak toplam boşlukların piksel sayısı hesaplatılmıştır. Bir pikselin kesit görüntülerdeki boyutu $187,5 \times 187,5 \mu\text{m}$ ’dir. Buna göre bir pikselin alanı hesaplanarak buradan elde edilen boşluk alanı sonuçları ile toplam piksel alanı

çarpılır ve böylece bir kesit görüntüdeki boşluk alanı belirlenir. Bu sonuç kesitteki toplam alanla oranlanarak porozite yüzde olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.2. Bir tomografi kesitinin Matlab programında piksel haritasının gösterimi

BT'de görüntülenecek numunelerin hazırlığı

BT'de görüntülenecek harç numuneleri basınç dayanımı deneyi için kullanılacak olan numunelerle aynı şekilde hazırlanmıştır. Ancak bu numuneler 40x40x160 mm boyutlarında kesilmeden muhafaza edilerek ve küre bırakılmıştır. Bu numunelerin kür koşulları basınç dayanımı ve boy uzama numuneleri ile aynıdır. Her tip çimento için 3'er kalıp standart çimento harç numunesi üretilmiştir. Elde edilen 9 numuneden 3'ü su, 3'ü Na₂SO₄ ve 3'ü MgSO₄ kürü için ayrılmıştır. Boşluk yapısı gelişimleri CEM I ve SRC çimentoları ile her farklı kür için 3'er numune üzerinden yapılmıştır.

BT numunelerinin referans numaraları Çizelge 3.10'da gösterilmiştir. Bu çizelgede gösterilen T harfi BT ile görüntüleme yapılacak numune ifadesi olarak tanımlanmıştır. BT numunelerinden 3 no'lu olanlar daha fazla boşluk oranı oluşturmak için içlerinde kapsüller yerleştirilerek hazırlanmışlardır.

Çizelge 3.10. BT’de görüntüleme yapılacak deney numunelerinin referans numaraları

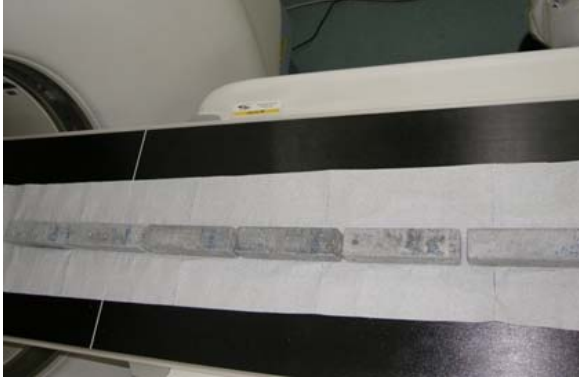
Çimento tipi	Kür koşulu	Referans numaraları		
PÇ 42,5R	Su	PST 1	PST 2	-
	Na ₂ SO ₄	PNT 1	PNT 2	PNT 3
	MgSO ₄	PMT 1	PMT 2	PMT 3
SDÇ 32,5	Su	SST 1	SST 2	-
	Na ₂ SO ₄	SNT 1	SNT 2	SNT 3
	MgSO ₄	SMT 1	SMT 2	SMT 3

Boşluk yapısı gelişim analizinde BT kullanımı

% 5’lik MgSO₄ ve % 5’lik Na₂SO₄ çözeltileri ile su içinde bekletilen numuneler 2, 7, 14, 21, 28, 70, 90, 120, 150, 180, 270, 360, 390 ve 560 gün yaşlarında GE marka Lightspeed scan VCTi model bir BT ile görüntülenmiştir. Bu işlem 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada Resim 3.2’de gösterildiği gibi PNT 1, PNT 2, PMT 1, PMT 2, PST 1 ve PST 2 numuneleri sırasıyla BT içine yerleştirildikten sonra görüntülenmiştir. İkinci aşamada Resim 3.3’de gösterildiği gibi SNT 1, SNT 2, SMT 1, SMT 2, SST 1 ve SST 2 numuneleri sırasıyla BT içine yerleştirildikten sonra görüntülenmiştir. Üçüncü aşamada Resim 3.4’de gösterildiği gibi PNT3, PMT3, SNT3, SMT3 ile çimento hamur numuneleri sırasıyla görüntülenmiştir. Bunlarla birlikte ilaç şişelerinde hazırlanan MgSO₄ ve Na₂SO₄ çözeltileri de Resim 3.4’de gösterildiği gibi görüntülenmiştir.



Resim 3.2. BT’de CEM I harç numuneleri



Resim 3.3. BT'de SRC harç numuneleri



Resim 3.4. BT'de CEM I ve SRC numuneleri ile kalibrasyon numuneleri

BT taramaları sırasında harç numunelerin arasına “AAA” tipi kalem pil yerleştirilmiştir. Böylece numunelerin aralarındaki mesafenin eşit olması sağlanmıştır. Ayrıca numuneler uzunlamasına dizilirken BT'nin lazer ışınlarıyla yapılan gönyeleme işleminden yararlanılarak harç numuneleri bir eksen üzerinde yerleştirilmiştir. Böylece her bir süreçte taranan harç numunelerin aynı şekilde taranması sağlanmıştır. Tarama sırasında her süreçte her bir numuneden toplam 255 kesit elde edilmiştir. Tek bir tarama sırasında bütün numunelerden elde edilen kesit sayısı ise 1630-1650 arasında değişmektedir. Buna göre 2, 7, 14, 21, 28, 70, 90, 120, 150, 180, 270, 360, 390 ve 560 gün yaşlarında taranan numunelerden toplam:

14 süreç x 3 seri x 1630 tomografi = 68460 tomografi kesiti elde edilmiştir. Her bir numune için ise 14 süreçte yaklaşık: 14 süreç x 255 tomografi= 3570 tomografi kesiti elde edilmiştir. Elde edilen BT sonuçları programda değerlendirilmiş olup

çizelge ve grafik ile sonuçlar verilmiştir. Kalibrasyon için taranan sülfat çözeltilerinin ve suyun içinde bekleyen çimento hamurlarının HU değerlerinin belirlenmesi için “3D Doctor” programından faydalanılmıştır. Programdan elde edilen HU değerleri Excel paket programına kopyalanarak tanımsal istatistik değerleri ile güven aralıkları belirlenmiştir. BT’den elde edilen görüntülerde “625 μm ”den daha büyük boyuttaki gözenekler üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca gözenekler tekil olarak incelenemediğinden dolayı, harç numunelerin tüm kesitleri üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Bu sebeple tomografi görüntülerinde tüm kesitler üzerinde Matlab programı ile tüm gözenekler ayrıştırılmış ve sonrasında toplam gözenek alanı çıkartılarak değerlendirmeye alınmıştır.

3.3. İstatistik analiz ve değerlendirme

Deneyssel çalışmadan elde edilen sonuçlar ayrı ayrı istatistiksel yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan istatistik yöntemler sırasıyla istatistik momentler (μ_x , σ_x , C_{vX} , C_{sX}), tanımlayıcı istatistik verileri (μ_x , σ_x ve standart hata) ve regresyon analizidir. Sonuçlar çizelge ve grafik üzerinde olarak görüntülenmiş ve ardından istatistik analiz sonuçları da dikkate alınarak yorumlanmıştır. Ayrıca deneylerin birbirleriyle olan karşılaştırmaları için niteleyici analiz yönteminden yararlanılmıştır. Elde edilen iki eksenli grafikler yardımıyla değerlendirmeler yapılmıştır.

Regresyon analizlerinde determinasyon katsayısı (R^2) değerleri her bir deney için çeşitli fonksiyonlar denenerek en yüksek determinasyon katsayısı veren denklem ve ona uygun fonksiyon eğrisi ile gösterilmiştir. Polinomik (ikinci derece denklem) ve logaritmik denklemler en yüksek determinasyon katsayısına sahip denklemler olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple basınç dayanımı deney sonuçlarında logaritmik ve polinomik denklemler, makro boşluk gelişimi analizinde polinomik denklemler kullanılmıştır.

Deney gruplarından elde edilen verilerin istatistik moment tipindeki parametreleri [175] aşağıdaki eşitliklerle hesaplanarak çizelgelerde gösterilmiştir.

n = Örnek sayısı

$$\mu_x = \text{Ortalama} = \sum x_i \cdot p(x_i) \quad (3.12)$$

$$\sigma_x = \text{Standart sapma} = \sqrt{\text{Var}(x)} \quad (3.13)$$

$$C_{vX} = \text{Değişim katsayısı} = \sigma_x / \mu_x \quad (3.14)$$

$$C_{sX} = \text{Çarpıklık katsayısı} = \mu_x^3 / \sigma_x^3 \quad (3.15)$$

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Boy Değişimi Deneyi

Çimento harç çubuklarının boy değişimi ölçümleri Bölüm 3.2.2’de anlatıldığı gibi yapılmıştır. Sonuçlar ASTM C 1157 standardında belirtilen limitlerle karşılaştırılmıştır [176]. Her bir deney grubundan elde edilen boy değişimi değerleri yaklaşık %0,001 hassasiyette hesaplanmıştır. Ancak ASTM C1012’ye göre ortalamalar yaklaşık %0,01 hassasiyetinde Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’te istatistik moment tipindeki parametreleri ile birlikte gösterilmiştir [131, 175]. ASTM C1012’de numune sayısına göre kabul edilebilir oranlar tablosu kullanılarak elde edilen deney sonuçlarından bazıları aritmetik ortalamaya ve istatistik analizde kullanılmamıştır. Deney sonuçlarında harç numunelerin boy değişim oranlarının ve her bir numunenin boy değişim dinamiğinin birbirlerinden oldukça farklı olduğu gözlenmiştir. Bu durumun harç çubukların farklı oranlarda sülfat emmesi, sıkıştırma oranlarındaki farklılıklar, gözenek ve kılcal yapı farklılıkları gibi nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.1. CEM I çimento harç çubuklarının boy değişimi istatistik momentleri

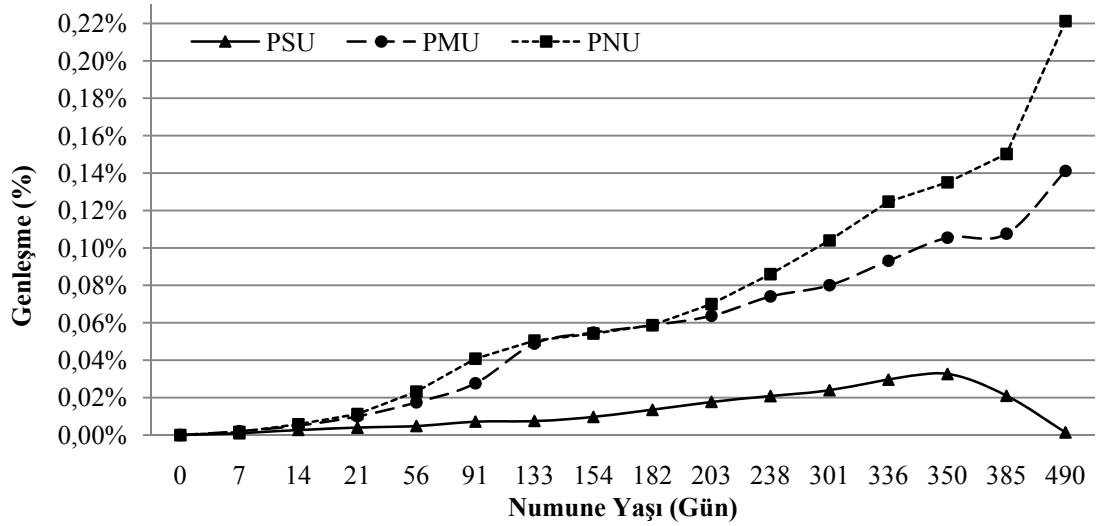
Numune yaşı (Gün)	PSU					PNU					PMU				
	n	μ (%)	σ (%)	C_{vx}	C_{sx}	n	μ (%)	σ (%)	C_{vx}	C_{sx}	n	μ (%)	σ (%)	C_{vx}	C_{sx}
0	5	0,00	0,000	-	-	5	0,00	0,000	-	-	6	0,00	0,000	-	-
7	5	0,00	0,002	1,78	2,16	5	0,00	0,001	0,73	-0,19	6	0,00	0,003	1,56	1,03
14	5	0,00	0,003	1,00	1,53	5	0,01	0,004	0,74	0,62	6	0,01	0,003	0,56	-0,04
21	5	0,00	0,005	1,27	1,91	5	0,01	0,006	0,50	0,77	6	0,01	0,005	0,45	0,51
56	5	0,00	0,006	1,27	1,55	5	0,02	0,007	0,31	0,48	6	0,02	0,006	0,32	0,75
91	5	0,01	0,009	1,22	1,66	5	0,04	0,006	0,16	-1,89	6	0,03	0,006	0,21	0,60
133	5	0,01	0,009	1,23	1,83	5	0,05	0,006	0,11	0,90	6	0,05	0,011	0,23	-0,12
154	5	0,01	0,010	1,02	1,13	5	0,05	0,003	0,06	0,55	6	0,05	0,011	0,21	0,54
182	5	0,01	0,011	0,82	0,34	5	0,06	0,006	0,10	0,86	6	0,06	0,009	0,15	0,63
203	5	0,02	0,009	0,53	-0,59	5	0,07	0,007	0,09	0,82	6	0,06	0,009	0,15	0,16
238	5	0,02	0,010	0,47	-0,34	5	0,09	0,015	0,18	0,89	6	0,07	0,017	0,24	0,33
301	5	0,02	0,011	0,44	-0,55	5	0,10	0,018	0,17	-0,10	6	0,08	0,019	0,24	-0,17
336	5	0,03	0,009	0,29	-0,01	5	0,12	0,022	0,18	-0,24	6	0,09	0,020	0,21	0,35
350	5	0,03	0,006	0,19	-0,29	5	0,14	0,040	0,30	0,99	6	0,11	0,026	0,25	0,28
385	5	0,02	0,009	0,44	-0,04	5	0,15	0,061	0,41	1,18	6	0,11	0,017	0,16	-0,14
490	5	0,00	0,005	3,84	2,11	5	0,22	0,067	0,30	-0,54	6	0,14	0,035	0,25	-0,01

Çizelge 4.2. SRC çimento harç çubuklarının boy değişimi istatistik momentleri

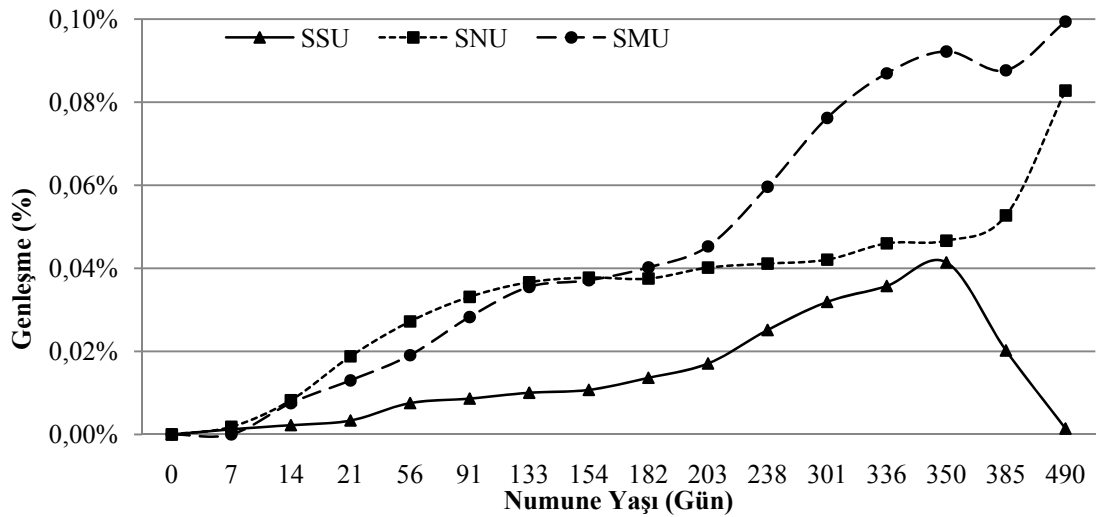
Numune yaşı (Gün)	SSU					SNU					SMU				
	n	μ (%)	σ (%)	C_{vx}	C_{sx}	n	μ (%)	σ (%)	C_{vx}	C_{sx}	n	μ (%)	σ (%)	C_{vx}	C_{sx}
0	3	0,00	0,000	-	-	5	0,00	0,000	-	-	5	0,00	0,000	-	-
7	3	0,00	0,001	1,01	0,05	5	0,00	0,003	1,70	1,86	5	0,00	0,000	-	-
14	3	0,00	0,002	1,03	0,29	5	0,01	0,002	0,29	0,06	5	0,01	0,006	0,77	1,53
21	3	0,00	0,003	0,91	0,25	5	0,02	0,007	0,38	-0,22	5	0,01	0,009	0,77	0,17
56	3	0,01	0,003	0,34	1,73	5	0,03	0,007	0,27	-0,04	5	0,02	0,011	0,60	-0,01
91	3	0,01	0,005	0,55	0,21	5	0,03	0,003	0,09	0,11	5	0,02	0,010	0,40	0,06
133	3	0,01	0,004	0,42	0,86	5	0,04	0,006	0,17	0,91	5	0,03	0,010	0,38	0,29
154	3	0,01	0,005	0,43	1,54	5	0,04	0,008	0,20	1,11	5	0,03	0,012	0,44	0,74
182	3	0,01	0,005	0,34	-0,44	5	0,04	0,010	0,26	1,34	5	0,03	0,012	0,40	0,35
203	3	0,02	0,007	0,42	1,19	5	0,04	0,014	0,35	1,71	5	0,04	0,017	0,46	0,55
238	3	0,03	0,010	0,40	0,83	5	0,04	0,016	0,39	1,49	5	0,05	0,016	0,30	-0,31
301	3	0,03	0,013	0,41	0,90	5	0,04	0,015	0,36	0,73	5	0,07	0,010	0,14	-1,46
336	3	0,04	0,015	0,42	0,73	5	0,05	0,015	0,32	0,07	5	0,08	0,015	0,18	1,38
350	3	0,04	0,017	0,40	0,05	5	0,05	0,013	0,29	0,24	5	0,09	0,013	0,15	0,59
385	3	0,02	0,018	0,88	0,32	5	0,05	0,007	0,14	0,35	6	0,09	0,017	0,19	0,06
490	3	0,00	0,011	7,71	-0,90	5	0,08	0,010	0,12	-0,50	6	0,10	0,005	0,05	-1,49

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de deney sonuçları üzerinden ASTM C1012’ye göre istatistik momentler aritmetik ortalama, standart sapma, varyasyon katsayısı ve çarpıklık olarak kaynaklarda tanımlanmıştır [175]. Buna göre deney sürecinin başlarında her grubun veri yayılımı daha geniş olmakla birlikte süreç ilerledikçe veri yayılımı azalmaktadır. Yani süreç ilerledikçe numunelerin boyca değişim oranları birbirlerine yaklaşmaktadır. Bu durum sülfatın etkisinin süreç ilerledikçe artmasıyla, numunelerdeki etki mekanizmalarının boyca değişime etkisini eşitlendiğini düşündürmektedir. Standart sapmalara göre; PNU harç numunelerinde diğer harç numunelere göre veriler arasında daha fazla sapma olduğu gözlenmiştir. Harç numunelerin ilk 182 günlük boy değişim verilerine göre standart sapmaların düşük değerler aldığı görülmektedir. Bu süreçten sonra CEM I harç numunelerinin boy değişimlerinde ani artışlar gözlenmiştir. CEM I harç numunelerinin boy değişimi deney sonuçları Şekil 4.1’de; SRC harç numunelerinin boy değişimi deney sonuçları Şekil 4.2’de grafik olarak gösterilmiştir CEM I harç numunelerinde aynı artış Şekil 4.1’de açıkça görülmektedir. Bu ani basamak şeklindeki artışların kür sularının tazelenmesiyle doğrudan ilişkili olduğu düşünülmektedir. Suyun pH değeri 6-8 arasında iken sülfatın etkisinin daha fazla görülmekte olduğu kaynak taramasında

belirtilmiştir [66]. Kür sularının tazelenmesi ile yükselmiş olan pH değeri (~10 - 13) tekrar ~7 seviyelerine gerilemiştir. Böylece sülfatın etkisi hızlanmış ve numunelerdeki boy uzamayı tetiklemiştir.



Şekil 4.1. CEM I çimentolu harç çubukların boy değişimi grafiği



Şekil 4.2. SRC çimentolu harç çubukların boy değişimi grafiği

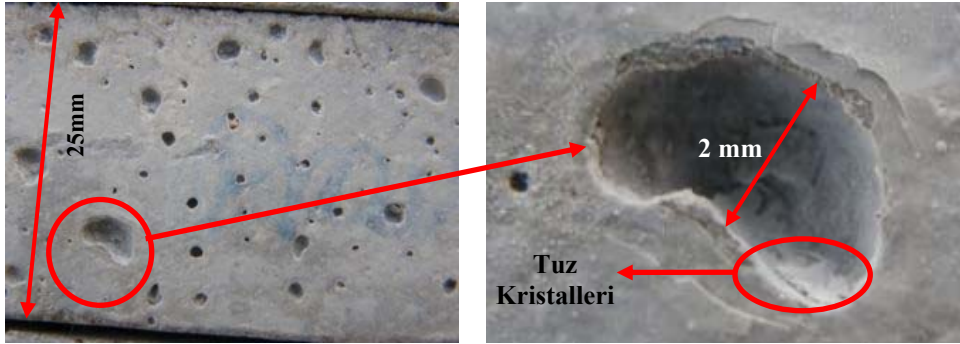
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilen boy değişimi deney sonuçlarına göre aşağıda verilen bulgulara ulaşılmıştır:

- CEM I ve SRC çimentolu harçlarda en az genleşme su içinde bekleyen numunelerde olmuştur. Yine suda bekletilen SRC harç numunelerinde CEM I harç numunelerine göre 56 gün yaşından sonra daha fazla boyca uzama olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin boy değişimi deneyi uygulamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Harç çubuklar vidalarından yaklaşık 70 cm yükseklikteki plastik bir kovada asılı olarak bekletilmiştir. Numunelerdeki uzamaların bir kısmının kendi ağırlıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. 350 gün yaşından sonra numunelerdeki boy değişimi kısılma eğilimine girmiştir. Bunun sebebinin önceden gözenekleri doldurarak numunede bir miktar genleşme oluşturan kristal yapının yıkanması sebebiyle boşluk yoğunluğunun azalarak harç numunelerde büzülme oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Bu durum BT analizleri ve su emme deney sonuçlarıyla desteklenmiştir.
- ASTM C1157 hidrolik çimento sınıflarında 360 günlük süreçte %0,1 genleşme limitini yüksek sülfat direnci olarak tanımlamıştır [176]. Buna göre $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltilerine maruz CEM I harç numunelerinin 360 gün sonunda %0,1 genleşme oranı aştığı için yüksek sülfat direncine sahip olmadığı belirlenmiştir.
- CEM I harç numunelerinin 350 gün sonunda su içindeki boy uzama değeri ~%0,04 mertebesindeyken, Na_2SO_4 çözeltisine maruz harç çubuklarında ~%0,14 ve $MgSO_4$ çözeltisine maruz harç çubuklarında ~%0,11 oranlarındadır. 490 gün sonunda sudaki numunelerin ortalama boy değişimleri %0 iken, Na_2SO_4 çözeltisine maruz harç çubuklarında ~%0,22 ve $MgSO_4$ çözeltisine maruz harç çubuklarında ~%0,14 oranlarında boyca uzamalar kaydedilmiştir.
- PNU harç numuneleri diğer kür koşullarına göre en fazla boyca uzama göstermiştir. Ayrıca bu harç çubukların 350 günden sonra kenarlarında çatlamların başladığı gözlenmiştir.
- 330 gün sonunda SRC harç numunelerinin su içindeki boy uzama değeri ~%0,04, Na_2SO_4 çözeltisine maruz harç çubuklarında ~%0,05 ve $MgSO_4$ çözeltisine maruz harç çubuklarında ~%0,09 oranında boyca uzama kaydedilmiştir. ASTM C1157 [176] kriterlerine göre deneylerde kullanılan SRC çimentosunun yüksek sülfat direncine sahip bir çimento olduğu belirlenmiştir.

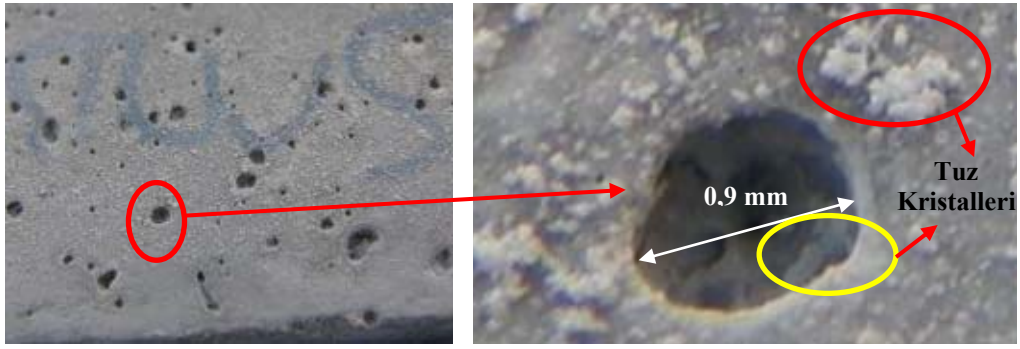
- SRC harçları için; SMU harç numuneleri 203 - 350 gün yaşları arasında diğer kür koşullarına göre daha fazla boyca uzama göstermiştir. Ayrıca bu harç çubukların 360 gün yaşından sonra köşelerinde çatlama ve dökülmeler olduğu gözlenmiştir.
- Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'ye göre 91-203 gün yaşları arasında harç numunelerin boyca uzama dinamiğinde bir yavaşlama görülürken 203 günün sonunda hızlı bir artış göze çarpmaktadır. Bunun sebebinin kür sularının tazelenme sürecinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 190 gün sonrasında sülfat derişiminin artmasıyla genleşmeye olan etkinin hızlandığı düşünülmektedir. Kasap ve arkadaşları [177] %5 Na₂SO₄ çözeltisine maruz çeşitli tipte çimentolar üzerinde 104 hafta süreyle boy uzama ölçümleri yapmışlardır. Bu çalışmadaki bulgulara göre OPC çimentolu harçlar 24 hafta sonunda parçalanmıştır. Çalışmada kullanılan çimentoda C₃A: %9,5, C₄AF: %11'dir. 55 hafta sonunda SRPC çimentolu harçlarda ise %0,12 boyca uzama kaydedilmiştir. SRPC'de C₃A: %3,6, C₄AF: %13,8'dir. Çalışmada çözeltilerin pH'ı kontrol edilmemiştir.
- Yapılan çalışmada 490 gün yaşındaki numunelerden ortalama %0,22 uzama oranıyla en fazla boyca uzama gösteren numune grubu PNU harçları olmuştur. Diğer harç numuneleri PMU, SMU ve SNU ortalama sırasıyla %0,14, %0,10 ve %0,08 ile PNU numunelerinden daha az uzama göstermişlerdir.

Boyca uzamanın sebebi çimentoda oluşan beş reaksiyon mekanizmasının gerçekleşmesidir. Mekanizmalar çimento içindeki SO₃, serbest CaO ve MgO miktarlarına bağlıdır. Diğer etkiler özgül yüzey ve gecikmeli etringit oluşumlarıdır [140]. Çalışmada su içindeki harç numunelerde gerçekleşen boyca uzamanın, bu mekanizmalardan bazılarının etkisi ile oluştuğu düşünülmektedir.

Boy değişimi deney numunelerinden 190 gün yaşında dijital fotoğraf makinesiyle çekilen makro fotoğraflar Resim 4.1 ve Resim 4.2'de verilmiştir. Fotoğraflarda görüldüğü gibi MgSO₄ çözeltisine maruz numunelerde tuz kristalleri oluşmuştur. Ayrıca PMU harç çubuklarının yüzeyinde oluşan gözeneklerin kenarlarında oluşan tuz kristalleri levha haline geldikten sonra çatlamaya başlamıştır. Bu tabakanın brusit olduğu düşünülmektedir. SMU numunelerinde diğerlerine göre farklı olarak tuz kristallerinin yüzeyde toplanarak oluştuğu gözlenmiştir.



Resim 4.1. PMU harç çubuklarında 27 hafta sonunda oluşan tuz kristalleri



Resim 4.2. SMU harç çubuklarında 27 hafta sonunda oluşan tuz kristalleri

4.2. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneylerinden elde edilen bulgular üzerinden istatistik momentler hesaplanarak sonuçlar aritmetik ortalama (μ), standart sapma (σ), varyasyon katsayısı (C_{yx}), görece yüzdesel gelişim olarak CEM I harç numuneleri için Çizelge 4.3'te ve SRC harç numuneleri için Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Bu sonuçlar harç numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılmasında kolaylık sağlamaktadır. TS500 [178]'de karakteristik basınç dayanımının istatistiksel bir değer olduğu ve dayanımın bu değer altına düşme olasılığının %10 ile sınırlı olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple aritmetik ortalama hesabı yapılırken $\pm\%10$ 'u dışındaki değerler aritmetik ortalamaya alınmamıştır.

Çizelge 4.3. CEM I harç numunelerinin basınç dayanımı istatistik momentleri

Numune Yaşı (Gün)	n	PSB				PNB				PMB			
		μ (MPa)	σ	C_{yx}	Gelişim (%)	μ (MPa)	σ	C_{yx}	Gelişim (%)	μ (MPa)	σ	C_{yx}	Gelişim (%)
1	4	16,6	1,00	0,06	32,5	16,6	1,00	0,06	32,5	16,6	1,00	0,06	32,5
2	4	27,6	1,85	0,07	54,1	27,6	1,85	0,07	54,1	27,6	1,85	0,07	54,1
3	4	31,9	1,15	0,04	62,4	31,9	1,15	0,04	62,4	31,9	1,15	0,04	62,4
7	4	45,0	0,85	0,02	88,1	46,1	0,70	0,02	90,2	43,7	1,68	0,04	85,5
14	4	48,5	1,26	0,03	94,9	49,7	1,40	0,03	97,2	47,2	1,28	0,03	92,4
21	4	51,6	2,52	0,05	98,6	51,9	2,02	0,04	101,5	47,2	1,85	0,04	92,3
28	4	51,1	1,10	0,02	100	52,0	3,05	0,06	101,7	48,6	0,83	0,02	95,0
70	4	55,4	2,85	0,05	108,4	54,4	1,89	0,03	106,4	54,6	0,87	0,02	106,7
91	4	57,1	1,65	0,03	111,6	57,8	1,82	0,03	113,0	55,9	1,91	0,03	109,3
130	4	57,4	2,49	0,04	112,3	58,2	1,52	0,03	113,9	58,4	2,10	0,04	114,2
180	4	59,2	3,29	0,06	115,9	57,5	1,02	0,02	112,5	55,5	0,87	0,02	108,6
280	4	60,3	1,70	0,03	117,9	51,7	1,21	0,02	101,1	54,1	2,21	0,04	105,8
390	4	65,8	2,57	0,04	128,6	51,2	3,15	0,06	100,2	52,9	2,72	0,05	103,4
560	4	66,1	1,52	0,02	129,3	7,90	0,71	0,09	14,5	35,6	1,69	0,05	69,6

Çizelge 4.3'te verilen CEM I harç numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçlarına göre;

- Suda bekletilen CEM I harç numuneleri 28 gün sonunda 51,1 MPa, 560 gün sonunda ise 66,1 MPa değerine ulaşarak 28 gün elde edilen basınç dayanımına göre yaklaşık %29,3 oranında artış göstermiştir. Bu numunelerin istatistik momentleri incelendiğinde gelişim katsayılarının 0,02-0,07 arasında olduğu görülmektedir. Bu durum basınç dayanımı deney numunelerinin ortalamaya göre çok fazla dağılmadığının ve yaklaşık olarak 1 - 3 MPa farkla birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Ayrıca sonuç olarak istatistik momentlere göre deney numuneleri arasında homojenlik vardır denilebilir.
- 560 gün sürecinde elde edilen sonuçlara göre suda bekletilen CEM I harç numunelerinin basınç dayanımları azalarak artış göstermiştir.
- Na₂SO₄ çözeltisine maruz CEM I harç numunelerinin 130 gün yaşına kadar ortalama basınç dayanımları referans numunelerine göre daha yüksek çıkarken, Bu yaştan sonra basınç dayanımında azalma gerçekleşmiştir. Ayrıca 130 gün

yaşından sonra referans numunelerine göre daha düşük basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Basınç dayanımındaki % cinsinden kayıp oranları 180, 280, 390 ve 560 gün yaşlarında sırasıyla %3,4, %17,8, %28,4 ve %113,9'dur. 560 gün yaşında elde edilen basınç dayanımı sonucu, numunenin yüzeyinde oluşan kırılma ve çatlaklardan dolayı güvenilir değildir. Ancak numunenin hasarı göz önüne alınarak basınç dayanımının çok düşük olduğu söylenebilir. Çizelgede ve şekillerde verilen 560 gün yaşındaki PNB harç numunelerinin ortalama değeri yaklaşık dayanım gelişimi eğrilerini oluşturabilmek amacıyla verilmiştir. Literatürde Na_2SO_4 etkisinin belli bir zamana kadar basınç dayanımını artırdığını, bunun sebebinin mikro ve makro gözeneklerin reaksiyon ürünleriyle dolarak malzemenin katı yoğunluğunu artırması ile açıklanmıştır. Sonrasında basınç dayanımındaki ani düşüşün sebebi ise sülfatın gözenek içinde portlanditle reaksiyona girerek genleşme ürünleri oluşturması ki bunlar alçı ve etringit oluşumu olarak açıklanmaktadır. [10, 179].

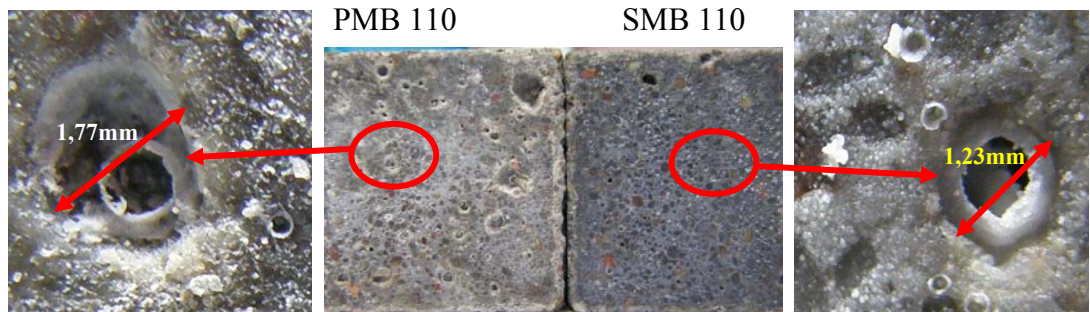


Resim 4.3. 560 gün yaşındaki Na_2SO_4 çözeltisine maruz CEM I harç numunesi

Na_2SO_4 çözeltisine maruz CEM I harç numunesinin 560 gün yaşında basınç dayanımı deneyi uygulanmadan önceki durumu Resim 4.3'te gösterilmiştir. Resimde de görüldüğü gibi sülfatın etkisi ve hasar oluşumu harç numunenin kalıba göre üst yüzeyinde daha fazla gözlenmiştir. Kalıba yerleşime göre numunenin alt yüzeyinde üst yüzeye göre daha hafif çatlamların olduğu ve üst yüzeydeki gibi kabuk soyulma görüntüsü bulunmadığı belirlenmiştir. Bu durumun numunenin alt kısmındaki boşluk oranının daha az olması sebebiyle olduğu düşünülmektedir. Böylece sülfat difüzyonu

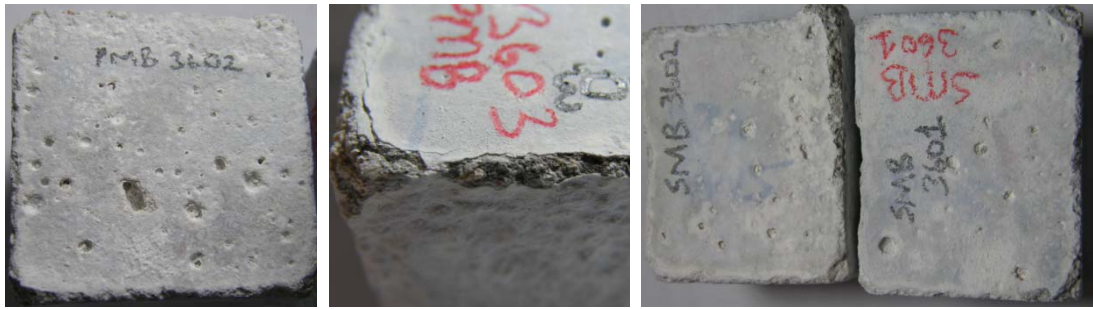
ve sülfat çözeltisinin harç numuneye gözeneklerden kapiler boşlukları kullanarak sızması nispeten engellenmiş olmaktadır. Bu durum bölüm 4.5'te ayrıntılı tartışılmıştır.

- MgSO_4 çözeltisine maruz kalan CEM I harç numunelerinin basınç dayanımları Na_2SO_4 çözeltisine maruz harç numunelerde olduğu gibi 130 gün yaşına kadar artmış sonrasında azalma eğilimine girmiştir. Bu numunelerin basınç dayanımlarının referans numunelere göre 90 gün yaşına kadar daha düşük, 130 gün yaşında yüksek, 180 gün yaşından sonra azaldığı tespit edilmiştir. Basınç dayanımındaki azalmalar 180, 280, 390 ve 560 gün yaşları için sırasıyla %7,2, %12,1, %25,2 ve %59,6 mertebesinde. Literatürde MgSO_4 etkisinin belli bir zamana kadar basınç dayanımını artırdığı, sonrasında Na_2SO_4 etkisinde olduğu gibi basınç dayanımını ani olarak düşürdüğü belirtilmektedir. Ancak MgSO_4 etkisi Na_2SO_4 'a göre 180 gün yaşına kadar daha az etki gösterdiği Şekil 4.3'te verilen grafik sonuçlarından görülmektedir. Bu etki azalmasının sebebinin MgSO_4 çözeltisine maruz harçların yüzeyinde oluşan brusit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) oluşumu işaret edilmektedir [180]. Resim 4.4 ve 4.5'te de görüldüğü gibi harç numunenin üstünde levha gibi beyaz bir tabaka oluşmuştur. Bu tabakanın brusit olduğu düşünülmektedir. Böylece çözelti içinde bulunan harç numune üzerindeki brusit tabakasının kalınlığı sebebiyle, sülfat iyonlarının difüzyonu azalmakta ve gecikmektedir.



Resim 4.4. PMB ve SMB numunelerinin 110 gün yaşındaki görüntüleri

Resim 4.4'te $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilen SRC ve CEM I harç numunelerinin 110 gün yaşındaki resimleri görünmektedir. Resimde görüldüğü gibi CEM I harç numunesinin köşeleri parçalanmaya başlamıştır. SRC harç numunesinde de köşe parçalanması görülmektedir. Ancak diğeri kadar belirgin değildir. Bu resimler dikkatle incelendiğinde PMB çimento harçlarında tuz kristallerinin yüzeyin her yerinde oluştuğu, SMB çimento harçlarında tuz kristalleri yoğunluğunun agregaların etrafında ve çimento hamurunun üstünde oluştuğu görülmektedir.



Resim 4.5. PMB ve SMB numunelerin 360 gün yaşındaki görüntüleri

Resim 4.5'te 360 gün yaşındaki PMB ve SMB numuneleri görülmektedir. Resimde görüldüğü gibi PMB numunelerinin köşe çizgileri parçalanma eğilimine girmiştir. Harç numunelerinin köşelerinde C-S-H moleküllerinin M-S-H'a dönüşümünün daha hızlı olması sebebiyle çimento hamuru aderansını kaybetmiştir [10]. Böylece çimento hamuru yumuşayarak agregaları bağlayan mekanizmanın yok olmasına sebep olmuştur. Bu nedenle numune köşelerinde bulunan agregalar çimento hamurundan kopmuş ve numune parçalanarak kütle kaybetmiştir. SMB harç numunelerinde de PMB'de olduğu gibi köşe parçalanmaları görülmüştür. Ancak, SMB'de PMB harç numunelerine göre daha az hasar görülmektedir. Her iki numune grubunda harç numuneler üzerindeki gözenekler incelendiğinde, gözeneklerin bir kısmının kristal ürünlerle tamamen dolduğu, bir kısmının ise kısmen dolu olduğu görülmüştür.

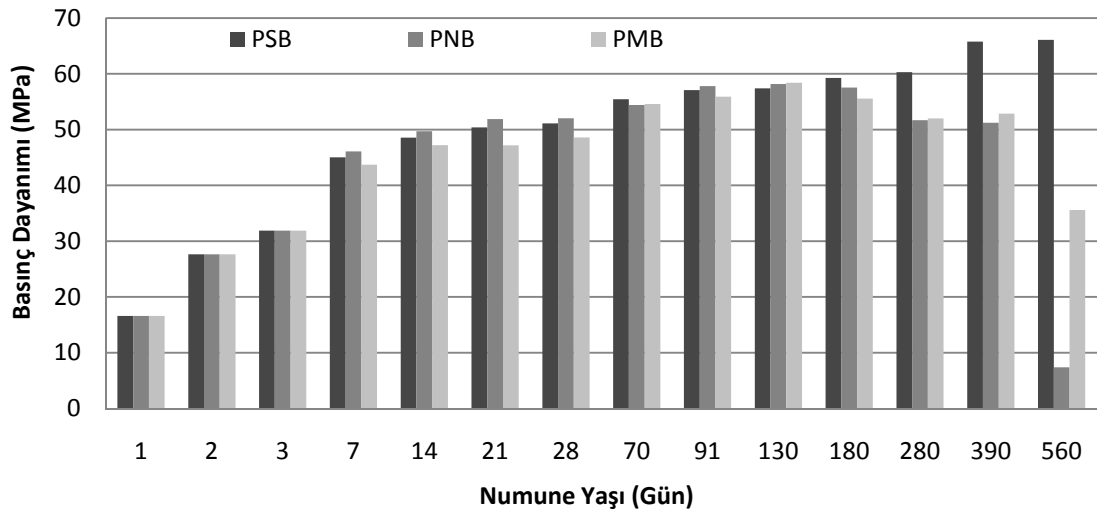
Diğer taraftan $MgSO_4$ etkisinin diğer sülfat tuzlarına göre reaksiyon kinetiği açısından daha saldırgan olduğu literatürde de belirtilmektedir. Ancak brusit tabakası

bu saldırganlığı kontrol etmektedir. $MgSO_4$ içeren çözeltilerde sülfat atağının şiddeti $Mg(OH)_2$ tarafından baskın şekilde kontrol edilmektedir. Brusit çözeltide kolayca çözülmez (Brusit'in çözülebilirliği 0,01 g/l, portlandit'in çözülebilirliği 0,37 g/l). Ayrıca çözelti pH'nın yaklaşık 10,5 seviyelerinde doygunluğa ulaşması sebebiyle etringit ve C-S-H kararsız hale gelme durumu söz konusudur. Bundan dolayı etringit oluşumu önemli derecede engellenmiş olur. Böylece bazı çevre şartlarında betonun sülfat etkisiyle hasar oluşumuna sebep olan ana etkenin alçı oluşumu olduğu da düşünülmektedir [180]. Benzer şekilde deneylerde kullanılan harç numunelerin yüzeyinde de brusit tabakası olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle 560 günlük süreçte basınç dayanımında Na_2SO_4 çözeltisine göre daha az kayıp gerçekleşmiştir. $MgSO_4$ çözeltisine maruz CEM I harç numunelerin 110 gün yaşından sonra köşelerinden parçalanmaya başladığı gözlenmiştir. Köşelerde harcın yumuşaması olarak adlandırılan çimentodaki bağlayıcı karakterdeki C-S-H bağlarının M-S-H'a dönüşmesi sebebiyle çimento hamuru harcın köşelerinde bağlayıcı özelliğini kaybetmiştir.

Numuneler üzerinde gözle yapılan diğer incelemelerde $MgSO_4$ çözeltisine maruz kalanların 450 gün yaşına kadar yüzeylerinde brusit olduğu tahmin edilen beyaz bir tabaka görülmüştür. Sonrasında zamanla incelen bu tabakanın altında numunelerin harita çatlakları şeklinde yüzeysel kılcal çatlaklar gözlenmiştir. Na_2SO_4 çözeltisine maruz harç numunelerde yüzeyde zamanla sarıya doğru değişen bir renk oluşumu ile birlikte kenarlardan başlayan çatlak gelişimi yoğun bir şekilde görülmüştür. Bu kenar çatlakları zamanla numunenin yaklaşık 3 – 5 mm derinliğinden yüzeyi kopararak kabuk halinde parçalanma davranışı göstermektedir. Bu mekanizma Santhanam ve arkadaşlarının belirttiği mekanizmaya uyumluluk göstermektedir [114, 128]. Bu sırada numunenin diğer yanlarında boyuna ve enine çatlaklar oluşarak numuneyi yarmaya çalışan bir mekanizma görülmüştür. Bu durum su emme deneylerine maruz kalan harç numunelerde daha net görülmektedir (Bkz. Resim 4.6). Burada sanki bir çiçeğin henüz açmaya başladığı an gibi harç numune çekirdeğinden dışa doğru parçalanmaktadır. Resimde CEM I harç numunedeki hasar oluşumunun SRC harç numunedeki hasar oluşumuna göre oldukça fazla olduğu görülmektedir.



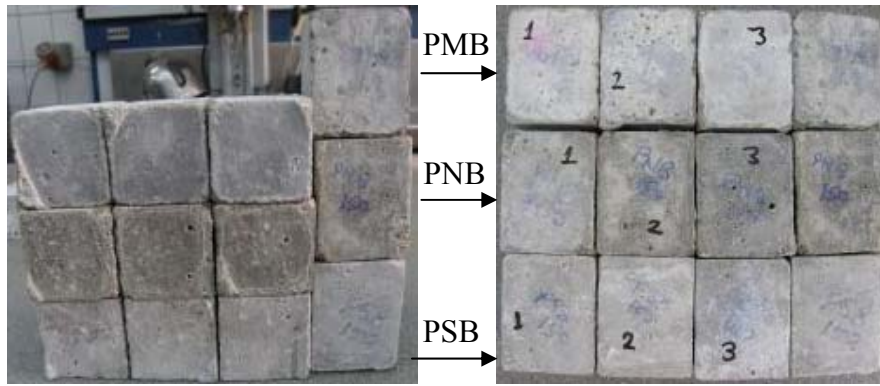
Resim 4.6. Na₂SO₄ çözeltisi içinde 560 gün yaşındaki CEM I ve SRC numuneleri



Şekil 4.3. CEM I harç numunelerinin basınç dayanımı – numune yaşı grafiği

Şekil 4.3'e göre sülfata maruz CEM I harç numunelerinin ilk 130 günlük süreçte basınç dayanımları azalarak artmaktadır. 130 gün yaşında en yüksek basınç dayanımına ulaşan harç numunelerinin sonraki süreçte basınç dayanımı hızla azalmaktadır. Na₂SO₄ çözeltisine maruz harç numunelerin basınç dayanımları ilk 130 günlük süreçte MgSO₄ çözeltisine maruz harç numunelere göre daha yüksek, ileriki yaşlarda ise düşük elde edilmiştir. Burada elde edilen sonuçlar Resim 4.7 ve Resim 4.8'deki görüntülerle desteklenmiştir. Resim 4.7'de görüldüğü gibi 280 gün yaşında PMU numunelerinin yüzeyinde beyaz bir film tabakası halinde tuz bulunmaktadır. Bu tuz tabakasının brusit (Mg(OH)₂) olduğu ve bu tabakanın sülfat difüzyonunu yavaşlatması sebebiyle dayanım kaybı ile ilgili reaksiyon ve etkileri bir süre

geciktirdiği düşünülmektedir. Resim 4.7’de PNB harç numuneleri incelendiğinde, yüzeyinde herhangi bir levha halinde tuz tabakası oluşmadığı, yüzey renginin griden sarıya dönüştüğü görülmektedir. Ayrıca numunelerin yüzeylerinde dalgalar halinde renk bozuklukları da dikkati çekmektedir. Resim 4.8’de PNB harç numunelerinin kenarlarından yaklaşık 5 mm içeride çatlama davranışının başladığı görülmektedir. Bu mekanizma literatürde kabuk atma olarak belirtilmiştir [114, 128]. Bu nedenle Na_2SO_4 çözeltisine maruz harç numuneler daha çabuk basınç dayanımlarını yitirmişlerdir.



Resim 4.7. 280 gün yaşında CEM I harç numunelerinin toplu görünümü



Resim 4.8. PNB harç numunelerinin 360 gün sonundaki görüntüleri

Çizelge 4.4. SRC harç numunelerinin basınç dayanımı istatistik momentleri

Numune Yaşı (Gün)	n	SSB				SNB				SMB			
		μ (MPa)	σ	C_{yx}	Gelişim (%)	μ (MPa)	σ	C_{yx}	Gelişim %	μ (MPa)	σ	C_{yx}	Gelişim %
1	4	12,4	0,29	0,02	33,3	12,4	0,29	0,02	33,3	12,4	0,29	0,02	33,3
2	4	20,0	0,51	0,03	53,6	20,0	0,51	0,03	53,6	20,0	0,51	0,03	53,6
3	4	21,2	1,18	0,06	57,0	21,2	1,18	0,06	57,0	21,2	1,18	0,06	57,0
7	4	30,8	1,55	0,05	82,6	30,6	1,92	0,06	82,2	30,1	0,74	0,02	80,8
14	4	33,2	1,38	0,04	89,2	33,1	1,20	0,04	89,0	32,4	0,50	0,02	87,0
21	4	35,3	1,53	0,04	94,9	34,9	0,53	0,02	93,9	34,6	0,99	0,03	92,9
28	4	37,2	0,83	0,02	100	37,0	1,75	0,05	99,4	35,3	1,60	0,05	94,8
70	4	38,8	0,99	0,03	104,1	39,6	0,38	0,01	106,3	38,8	1,01	0,03	104,2
91	4	39,4	2,71	0,07	105,9	41,4	1,39	0,03	111,3	39,1	0,83	0,02	105,0
130	4	42,6	1,92	0,05	114,5	42,8	2,98	0,07	114,9	41,7	2,05	0,05	112,1
180	4	44,3	2,76	0,06	118,9	44,8	1,45	0,03	120,5	42,6	2,31	0,05	114,3
280	4	45,5	1,03	0,02	122,1	45,1	0,99	0,02	121,0	43,9	2,86	0,07	117,9
390	4	50,3	2,40	0,05	135,0	48,5	1,77	0,04	130,4	44,8	0,87	0,02	120,3
560	4	56,2	1,90	0,03	151,1	42,5	2,01	0,05	114,2	47,9	1,35	0,03	128,8

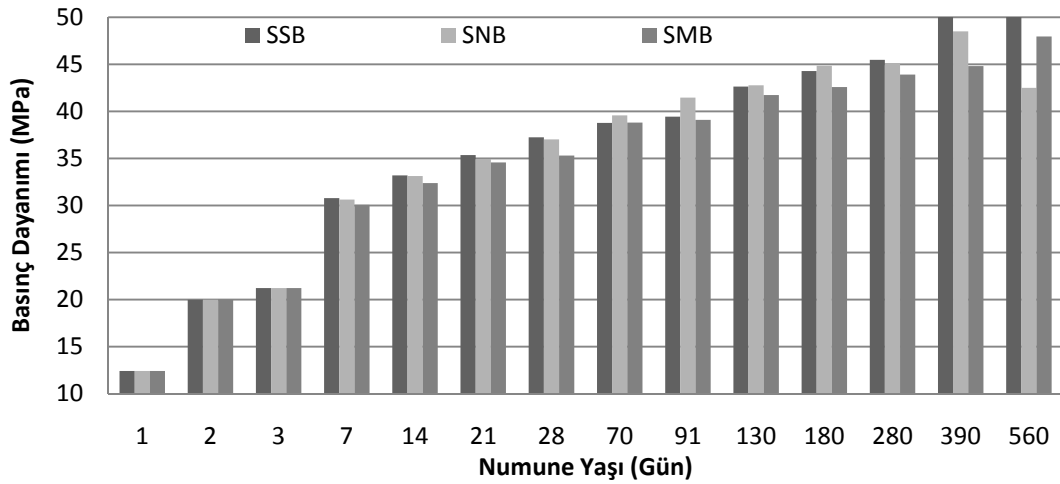
Çizelge 4.4'te verilen deney sonuçlarına göre:

- Deney numunelerinin istatistik momentleri incelendiğinde gelişim katsayılarının 0,02-0,07 arasında olduğu görülmektedir. Bu durum basınç dayanımı deney numunelerinin ortalamaya göre çok fazla dağılmadığını ve standart sapma sonuçları ise basınç dayanımlarının yaklaşık olarak 0 - 3 MPa farkla birbirine yakın olduğunu göstermektedir.
- Suda bekletilen SRC harç numuneleri 28 gün sonunda ortalama 37,2 MPa değerine, 560 gün sonunda ise ortalama 56,2 MPa değerine ulaşarak, 28 gün sonunda elde edilen basınç dayanımına göre yaklaşık %51,1 oranında artış göstermiştir.
- SRC ile üretilen Na_2SO_4 çözeltisine maruz kalan harç numunelerinin ortalama basınç dayanımları ilk 28 gün yaşına kadar referans numuneleri ile yakın değerlerde olduğu görülmektedir. 28 - 180 gün yaşları arasında ise referans numuneye göre basınç dayanımları daha yüksek elde edilmiştir. Bunun sebebinin CEM I çimentolarında olduğu gibi gözeneklerin bir kısmının reaksiyon ürünleri ile (kristal ürünler: etringit ve alçı) dolması şeklinde düşünülmektedir. Kontrol

harcına göre 280, 390 ve 560 gün yaşlarında basınç dayanımı kayıpları göreceli olarak sırasıyla %1,1, %4,6 ve %36,9 olarak hesaplanmıştır.

- SRC ile üretilen $MgSO_4$ çözeltisine maruz harç numunelerinde 280 gün yaşına kadar referans numunelere göre basınç dayanımlarında %1-5 mertebesinde azalma belirlenmiştir. 280, 390 ve 560 gün yaşlarındaki basınç dayanımı kayıpları incelendiğinde referans numunelere göre sırasıyla %4,21, %14,68 ve %22,16 azalmıştır. Bu deney sonuçları literatürde belirtilen $MgSO_4$ çözeltisinin kimyasal etki mekanizması ile benzeşmektedir. Numune yüzeylerinde brusit oluşuncaya kadar gerçekleşen difüzyon sonucunda bir kısım çözelti numune içine sızarak numunede öncelikle kristal ürünlerinin oluşmasına ve sonrasında bağlayıcı molekül olan C-S-H yapısını bir miktar bozarak M-S-H yapısına dönüştürmesi olarak düşünülmektedir.

Sülfata maruz SRC harç numunelerinin basınç dayanımı – numune yaşı grafikleri Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. SRC harç numunelerin basınç dayanımı – numune yaşı grafiği

Sülfata maruz çimento harçlarında gerçekleşen basınç dayanımındaki artışın genel sebebi literatürde şu şekilde açıklanmıştır: Hava boşlukları içinde oluşan tuz kristallerinin büyümeye devam etmesi sonucunda boşluk çeperlerine dayanması ve harcın toplam yoğunluğunun artması sonucunda basınç dayanımı artmaktadır [177].

Düşüş eğrisi ise etringit ve alçı oluşumları sonucunda yine gözeneklerde kristal gelişimlerinin boşluk çeperlerine gerilim uygulaması sonucunda mikro çatlakların oluşması ile açıklanmıştır. Ayrıca etringit ve alçı oluşumu sırasında çimento hamurundaki C-S-H yapısının bozulması sonucunda çimento hamurundaki aderans kaybı ile basınç dayanımında azalmaların görülmesi beklenen bir sonuçtur [1, 7, 75].

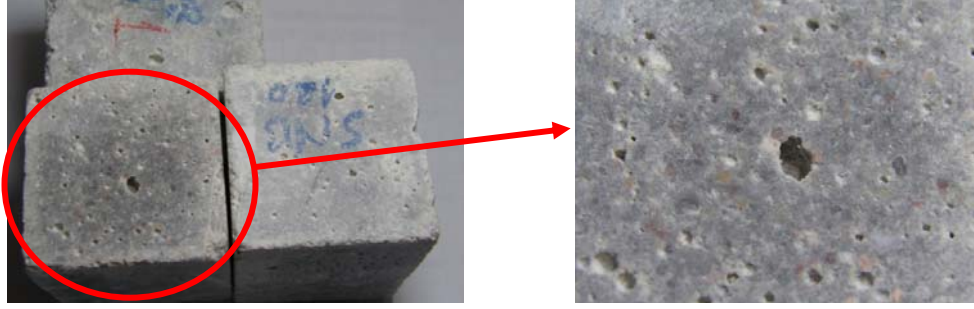
Sülfat etkisindeki SRC harç numunelerinin basınç dayanımı gelişim grafiğine göre, 390 günlük süreçte Na_2SO_4 etkisi SRC harçlarının basınç dayanımlarını önemli oranda etkilememiştir. Bu durumun etringit ve alçının oluşum mekanizmasını doğrudan etkileyen C_3A miktarının SRC’de az olması nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Ancak SRC harç numunelerinde Na_2SO_4 ’ın yıkıcı etkisinin CEM I’e göre daha ileriki süreçlerde görülmesi beklenmektedir. MgSO_4 çözeltisinin etkileri açısından grafik değerlendirildiğinde, etringit ve alçı oluşumu ile C-S-H’nin M-S-H’a dönüşüm mekanizmalarının 130 gün yaşından itibaren etkisini artırdığı söylenebilir. Böylece su içinde ve Na_2SO_4 çözeltisi içinde kürlenmiş harç numunelere göre 390 günlük sürece kadar daha düşük dayanım elde edildiği görülmektedir. Ancak 560 gün yaşında Na_2SO_4 çözeltisi içinde kürlenmiş harç numunelerin daha fazla dayanım kaybederek en düşük dayanıma ulaştığı belirlenmiştir.

Literatürde MgSO_4 ve Na_2SO_4 etkileri çeşitli şekillerde denenmiştir. Bunlara göre her iki saldırgan çözeltiden hangisinin daha fazla ve daha hızlı etki yaptığı henüz net değildir. Bu çalışmada, 560 gün sonunda PNB referanslı harç numunelerin PMB, SNB ve SMB referanslı numunelere göre daha fazla dayanım yitirdiği belirlenmiştir. Bu sebeple genel olarak Na_2SO_4 etkilerinin MgSO_4 ’a göre daha hızlı ve saldırgan olduğu, ancak özel olarak CEM I çimentoları için Na_2SO_4 etkilerinin MgSO_4 ’a göre daha hızlı ve saldırgan olduğu, SRC çimentoları için MgSO_4 etkilerinin 390 gün yaşına kadar Na_2SO_4 ’a göre daha hızlı ve saldırgan olduğu söylenebilir. 560 günlük süreçte SRC çimentosunun CEM I’e göre sülfata daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir.

Sülfat etkilerini fiziksel olarak tanımlamak amacıyla numunelerin yüzeyinde oluşan hasarlar incelenmiştir. Bu amaçla 7,1 megapiksel çözünürlüğe sahip dijital bir

fotoğraf makinesiyle görüntüleme yapılmıştır. Resim 4.9, Resim 4.10, Resim 4.11 ve Resim 4.12’de 360 gün yaşındaki numuneler için SNB, PNB, SMB ve PMB örneklenmiştir. Resimlerde görüldüğü gibi $MgSO_4$ çözeltisine maruz numunelerde yüzey bozuklukları diğer gruplara göre daha fazla görülmektedir. Bunların yanı sıra Na_2SO_4 çözeltisine maruz numuneler incelendiğinde SRC harç numunelerinde yüzey bozuklukları daha az gözlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçları fotoğraflarda görülen bozulmaların mekanik ifadesi olarak değerlendirilmektedir.

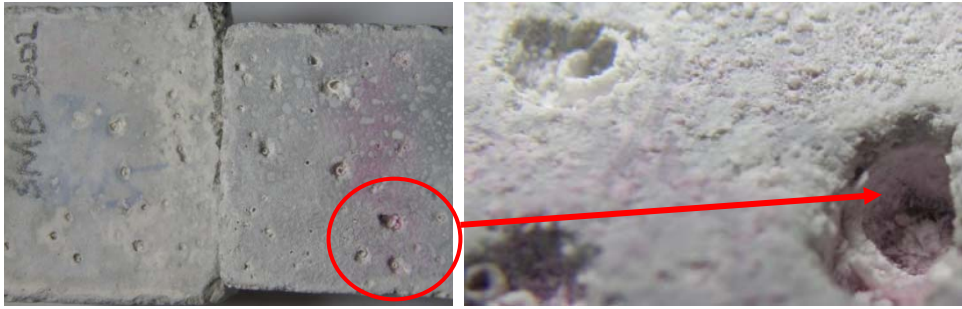
Resim 4.9 - 4.12’de görülen numuneler 360 gün sonunda kürden çıkarıldıktan sonra yüzeyleri kurulanıp dijital fotoğrafları çekilmiştir. Resim 4.9 – 4.12’de görüldüğü gibi CEM I harç numunelerde tuz kristallerinin oluşumu sonucunda boşluklar kapanmış ve içsel gerilmeler sonucunda çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlak oluşumları daha çok PMB ve PNB numunelerinde görülmektedir. SMB ve SNB numunelerinde ise boşluklar içinde kristalleşme sürmekte olup henüz gözenekler tamamen dolmamıştır. Ayrıca SRC harç numunelerde köşe kırılmalarına çok az rastlanmıştır. Bu nedenle numunelerdeki basınç dayanımı gelişimleri dikkate alınırsa PNB ve PMB numuneleri, SNB ve SMB numunelerinin basınç dayanımlarına göre daha fazla mukavemet kaybına uğramıştır. Na_2SO_4 ’a maruz CEM I harç numunelerinin köşe kırıklarında yoğun kristal oluşumu gözlenirken, $MgSO_4$ ’a maruz CEM I harç numunelerinde oluşan köşe kırıklarında agregaların çimentodan ayrıştığı gözlenmiştir. Diğer taraftan basınç dayanımı deneyine tabi tutulan numuneler kırılma sırasında ve kırıldıktan sonra incelenmiştir. Kırılma sırasında SRC ile hazırlanan harç numuneleri narin bir kırılmayla sadece dış kısımlarından parçalanırken, CEM I ile hazırlanan numuneler dağılarak gevrek kırılmalar olmuştur. Bu şekilde gevrek kırılan numuneler tamamen parçalanmakta ve dağılmaktadır. CEM I harç numuneleri kırılma sonrası incelendiğinde içindeki sertleşmiş harcın toz gibi dağıldığı gözlenmiştir. Bu durum özellikle $MgSO_4$ çözeltisine maruz numunelerde daha belirgindir. Gevrek kırılmalar CEM I harç numunelerinde 28 gün yaşındaki sonraki süreçlerin hepsinde gözlenmiştir.



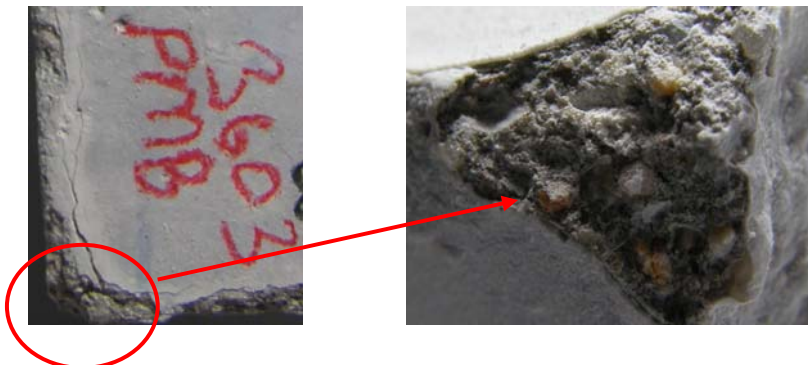
Resim 4.9. 360 gün yaşındaki SNB numunelerinin yüzeyindeki gözeneklerin durumu



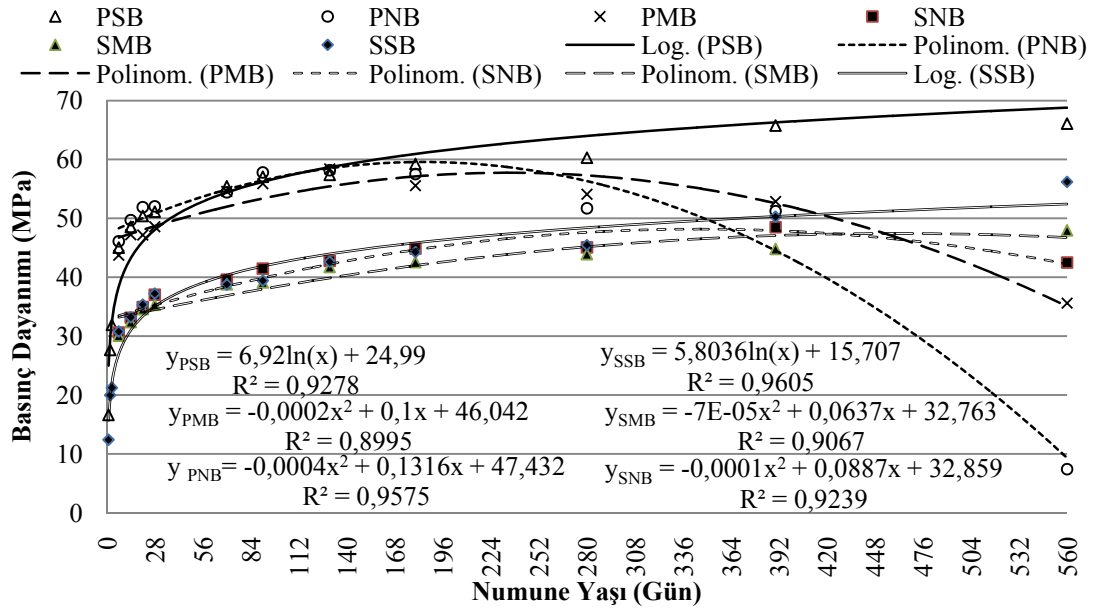
Resim 4.10. 360 gün yaşındaki PNB numunelerin yüzeyinde oluşan bozulmalar



Resim 4.11. 360 gün yaşındaki SMB numunelerin yüzeyindeki gözeneklerin durumu



Resim 4.12. 360 gün yaşındaki PMB numunelerinin yüzeyinde oluşan bozulmalar



Şekil 4.5. CEM I ve SRC harç numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları regresyon grafikleri

Şekil 4.5'te basınç dayanımı deney sonuçları ile Excel programı kullanılarak regresyon grafikleri oluşturulmuştur. Denenen fonksiyonlar arasında R^2 değerlerini en yüksek veren grafik çizilmiştir. Regresyon denklemleri ve R^2 değerleri şekil içlerinde verilmiştir. Determinasyon katsayısı olarak tanımlanan R^2 değerinin 1,00'e yakınlığı verilerin uygunluğunu gösteren bir ifadedir. Burada amaç, göz önüne alınan değişkenler arasında anlamlı bir ilişkinin olup olmadığını belirlemek, eğer bir ilişki varsa bu ilişkiyi tanımlayan regresyon denklemini bulmaktır. Böylece denklemi kullanarak yapılacak tahminlerin güven aralığı hesaplanabilir [175]. Regresyon analizlerinden elde edilen denklemlerdeki R^2 değerleri 0,9'dan yüksektir. Ayrıca SSB ve SNB için 0,95'in üstünde, PSB ve SMB için 0,90'ın üstünde değerler elde edilmiştir. Elde edilen R^2 değerleri, verilerin en az %90 uyumluluğunun bir göstergesidir. Bu numuneler için elde edilen veriler denklemin en fazla %96 uyumluluğu için verimlidir. Veri sayısı artarsa daha uygun denklemlere ulaşılabilir. SSB ve PSB grupları için logaritmik denklem uygunken, SMB, SNB, PNB ve PMB grupları için 2. dereceden bir denklem uygun bulunmuştur.

4.3. Su Emme Deneyi

Su emme deneyinden elde edilen ağırlıkça kuru özgül ağırlık, görünür özgül ağırlık sonuçları Çizelge 4.5'te, ağırlıkça su emme ve görünür boşluk oranı sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelgelerde tanımsal istatistik verileri hesaplanmış ve deneylerde elde edilen en az değer ile en çok değer de belirtilmiştir.

Çizelge 4.5. Su emme deney sonuçları (Kuru özgül ağırlık ve Görünür özgül ağırlık)

Deney adı			Kuru Özgül Ağırlık (kg/dm ³)				Görünür Özgül Ağırlık (kg/dm ³)			
Numune Kodu	İstatistik veriler	n	Zaman (Gün)				Zaman (Gün)			
			28	180	360	560	28	180	360	560
PSS	μ	4	1,72	1,73	1,76	1,90	2,00	2,00	2,04	2,22
	σ		0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
	En az		1,71	1,72	1,73	1,88	1,98	1,98	2,03	2,21
	En çok		1,73	1,75	1,78	1,92	2,01	2,02	2,06	2,24
	Std. Hata		0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
PNS	μ	4	1,75	1,76	1,76	1,81	2,00	2,01	2,02	2,25
	σ		0,08	0,04	0,04	0,07	0,03	0,03	0,05	0,02
	En az		1,60	1,69	1,70	1,70	1,96	1,97	1,96	2,24
	En çok		1,77	1,78	1,79	1,86	2,02	2,03	2,06	2,28
	Std. Hata		0,04	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01	0,02	0,01
PMS	μ	4	1,77	1,77	1,77	1,88	2,02	2,02	2,03	2,27
	σ		0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
	En az		1,76	1,76	1,75	1,84	2,01	1,99	2,01	2,25
	En çok		1,79	1,79	1,79	1,91	2,04	2,04	2,05	2,29
	Std. Hata		0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
SSS	μ	4	1,74	1,76	1,78	1,91	2,04	2,07	2,1	2,28
	σ		0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01
	En az		1,72	1,75	1,76	1,89	2,02	2,04	2,07	2,27
	En çok		1,76	1,79	1,81	1,95	2,07	2,11	2,12	2,30
	Std. Hata		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
SNS	μ	4	1,77	1,78	1,78	1,90	2,02	2,02	2,04	2,27
	σ		0,05	0,06	0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02
	En az		1,74	1,73	1,73	1,86	2,00	1,98	1,99	2,25
	En çok		1,85	1,87	1,85	1,95	2,04	2,03	2,06	2,30
	Std. Hata		0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
SMS	μ	4	1,76	1,77	1,78	1,91	2,04	2,04	2,06	2,27
	σ		0,02	0,03	0,05	0,02	0,02	0,04	0,05	0,02
	En az		1,75	1,73	1,73	1,89	2,02	1,98	1,99	2,24
	En çok		1,79	1,80	1,83	1,92	2,06	2,07	2,10	2,28
	Std. Hata		0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01

Çizelge 4.6. Su emme deney sonuçları (Ağırlıkça su emme ve Görünür boşluk oranı)

Deney adı			Ağırlıkça Su Emme (%)				Görünür Boşluk Oranı (%)			
Numune Kodu	İstatistik veriler	n	Zaman (Gün)				Zaman (Gün)			
			28	180	360	560	28	180	360	560
PSS	μ	4	7,88	7,84	7,74	7,44	13,58	13,52	13,64	14,16
	σ		0,06	0,07	0,04	0,07	0,34	0,38	0,46	0,55
	En az		7,81	7,77	7,69	7,36	13,16	13,10	13,22	13,74
	En çok		7,95	7,92	7,79	7,51	14,00	13,94	14,06	15,08
	Std. Hata		0,03	0,03	0,02	0,03	0,17	0,19	0,23	0,28
PNS	μ	4	7,05	7,09	7,31	10,73	12,38	12,48	12,87	19,44
	σ		0,06	0,17	0,24	0,42	0,21	0,43	0,88	0,61
	En az		7,01	6,90	7,01	10,37	12,10	12,20	12,59	18,89
	En çok		7,13	7,29	7,57	11,33	12,61	12,71	13,10	20,23
	Std. Hata		0,03	0,08	0,12	0,21	0,11	0,22	0,44	0,30
PMS	μ	4	6,87	6,90	7,09	9,17	12,18	12,23	12,57	17,2
	σ		0,13	0,25	0,39	0,61	0,13	0,52	1,16	0,98
	En az		6,84	6,62	6,60	8,24	12,00	12,05	12,39	16,06
	En çok		7,00	7,17	7,49	10,78	12,31	12,36	12,70	18,40
	Std. Hata		0,07	0,13	0,20	0,31	0,07	0,18	0,37	0,49
SSS	μ	4	8,60	8,51	8,47	8,32	14,95	14,96	15,10	16,02
	σ		0,12	0,14	0,12	0,41	0,15	0,06	0,26	0,53
	En az		8,45	8,38	8,35	7,89	14,79	14,80	14,94	15,38
	En çok		8,75	8,71	8,63	8,86	15,12	15,13	15,27	16,46
	Std. Hata		0,00	0,01	0,01	0,00	0,07	0,03	0,13	0,26
SNS	μ	4	7,58	7,59	7,82	8,74	13,22	13,28	13,70	16,56
	σ		0,19	0,08	0,05	0,07	0,35	0,57	0,43	0,94
	En az		7,33	7,36	7,75	7,89	12,78	12,84	13,26	15,38
	En çok		7,78	7,77	7,87	9,50	13,62	13,68	14,10	17,68
	Std. Hata		0,09	0,04	0,03	0,33	0,17	0,28	0,22	0,47
SMS	μ	4	7,63	7,62	7,74	8,33	13,45	13,49	13,77	16,12
	σ		0,26	0,34	0,51	0,26	0,37	0,46	0,98	0,40
	En az		7,39	7,32	7,10	8,06	13,18	13,22	13,50	15,52
	En çok		7,98	8,06	8,16	8,67	13,98	14,02	14,30	16,46
	Std. Hata		0,13	0,17	0,25	0,12	0,18	0,23	0,49	0,20

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da verilen bulgularda suda bekletilen CEM I harç numunelerinin 560 günlük süreçte su emme deneyi sonuçlarına göre:

- Ağırlıkça su emme oranı %0,44 oranında azalmıştır.
- Kuru özgül ağırlığı 0,18 kg/dm³ ve %10 oranında artmıştır.
- Görünür özgül ağırlık 0,22 kg/dm³ ve %11 oranında artmıştır.

- Görünür boşluk oranı %0,58 oranında artmıştır.

Su içinde bekletilen SRC harç numunelerinin 560 günlük süreçte su emme deneyi sonuçlarına göre:

- Ağırlıkça su emme oranı %0,28 oranında azalmıştır.
- Kuru özgül ağırlığı $0,17 \text{ kg/dm}^3$ ve %9,77 oranında artmıştır.
- Görünür özgül ağırlık $0,24 \text{ kg/dm}^3$ ve %11,76 oranında artmıştır.
- Görünür boşluk oranı %1,07 oranında artmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre suda kür yapılan her iki çimento grubunda da su emme değeri azalmıştır. Bunun sebebi kapiler boşlukların bir kısmının zamanla kapanarak numunenin içine su sızmasının engellenmesi olduğu düşünülmektedir. Özgül ağırlıktaki artışın sebebi ise gözenek çeperlerinde oluşan portlandit gibi kristal yapıların numune yoğunluğunu artırması ile açıklanabilir. 560 günlük süreçte boşluk oranındaki artışın sebebinin ise BT verilerinden elde edilen sonuçlarda da görüldüğü gibi belli bir süreden sonra kür sularının tazelenmesi sebebiyle *bir kısım* gözenek içindeki kristal yapılar yıkanarak kür suyuna çıkmaktadır. Böylece görülen boşluk oranları artmaktadır. Bu durum literatürde “portlandit’in yıkanması (leaching)” olarak adlandırılmaktadır [73]. SRC harç numunelerin kuru ve görünür özgül ağırlıkları, ağırlıkça su emme oranları ve görünür hava boşlukları CEM I harç numunelerine göre daha fazladır.

Su içinde 560 gün süreyle bekletilmiş CEM I ve SRC harç numunelerinin su emme deney sonuçlarının karşılaştırılması:

- PSS harç numunelerinde ağırlıkça su emme oranında daha fazla kayıp olmuştur.
- PSS harç numunelerinde kuru özgül ağırlıkta, SSS harç numunelerinde görünür özgül ağırlıkta daha fazla artış olmuştur.
- SSS harç numunelerinde görünür boşluk oranındaki artış %1,07 oranla fazladır.
- SSS harç numunesinin ağırlıkça su emme oranı %8,60 oranla daha fazladır.
- SRC harç numunesinin görünür özgül ağırlığı $2,28 \text{ kg/dm}^3$ ile daha fazladır.

- 28 gün yaşında SRC harç numunesinin görünür boşluk oranı CEM I harç numunesine göre %1,37 oranla daha fazladır.
- 28 - 560 gün yaşları arasında CEM I harç numunesinin görünür boşluk oranı SRC harç numunesine göre %0,49 daha az oranda artmıştır.

560 günlük süreçte Na_2SO_4 çözeltisine maruz CEM I harç numuneleri için su emme deney sonuçlarına göre:

- Ağırlıkça su emme oranı %3,68 oranında artmıştır.
- Kuru özgül ağırlık $0,06 \text{ kg/dm}^3$ ve %3,4 oranında artmıştır.
- Görünür özgül ağırlık $0,25 \text{ kg/dm}^3$ ve %12,5 oranında artmıştır.
- Görünür boşluk oranı %7,06 artmıştır.

560 günlük süreçte Na_2SO_4 çözeltisine maruz SRC harç numunelerinin su emme deney sonuçlarına göre:

- Ağırlıkça su emme oranı %1,16 oranında artmıştır.
- Kuru özgül ağırlığı $0,13 \text{ kg/dm}^3$ ve %7,34 oranında artmıştır.
- Görünür özgül ağırlık $0,25 \text{ kg/dm}^3$ ve %12,38 oranında artmıştır.
- Görünür boşluk oranı %3,34 oranında artmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre Na_2SO_4 çözeltisine maruz her iki çimento grubunda da tüm fiziksel özellikler artmıştır. Buna göre gözeneklerde oluşan tuz kristalleri numunenin yoğunluğunu artırırken aynı zamanda etringit ve alçı oluşumu ile birlikte çatlaklar ve kırılmalarla birlikte harçlarda oluşan hasar sonucunda görünür boşluk oranı yüksek oranda artmıştır. Na_2SO_4 'a maruz SRC ve CEM I harç numunelerinde diğer koşullara göre en yüksek görünür boşluk oranı elde edilmiştir. Bu durum 560 gün sürecinde en fazla hasar oluşturan koşulun Na_2SO_4 'ın etkisi ile olduğunun bir göstergesidir. Sonuçlar görünür boşluk oranları açısından değerlendirildiğinde, Na_2SO_4 'a maruz CEM I harç numuneleri 560 günlük süreçte yaklaşık %7 oranında artış gösterirken, SRC harç numunelerinde yaklaşık %3 oranında artış görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar SRC harç numunelerinin CEM I harç numunelerine göre

içyapısında daha az hasar oluşturduğunu ve Na_2SO_4 'a karşı direncinin daha yüksek olduğunun bir göstergesidir. Ağırlıkça su emme oranları açısından sonuçlar değerlendirildiğinde, Na_2SO_4 'a maruz CEM I harç numuneleri 560 günlük süreçte yaklaşık %3,5 oranında artış gösterirken, SRC harç numunelerinde yaklaşık %1 oranında artış görülmüştür. Buna göre CEM I harç numunelerinin içinde oluşan çatlamlar, SRC'ye göre daha fazladır. Bu sebeple CEM I harç numuneleri daha fazla su emerken SRC harçlarının daha az su emdiği sonucuna varılmıştır.

Na_2SO_4 çözeltisine maruz CEM I ve SRC harç numunelerinin 560 gün yaşında su emme deney sonuçlarının karşılaştırmaları:

- CEM I harç numunelerinin ağırlıkça su emme oranı %3,68 daha fazla artmıştır.
- SRC harç numunelerinin kuru özgül ağırlığı $0,13 \text{ kg/dm}^3$ ile daha fazla artmıştır.
- SRC ve CEM I harç numunelerinin görünür özgül ağırlığı $0,25 \text{ kg/dm}^3$ ile eşit değerde artmıştır.
- CEM I harç numunelerinin görünür boşluk oranı %7 oranla daha fazla artmıştır.
- CEM I harç numunesi %10,73 ile en yüksek ağırlıkça su emme oranına sahiptir.
- SRC harç numunelerinin kuru özgül ağırlık ortalaması $1,90 \text{ kg/dm}^3$ ile daha fazladır.
- SRC harç numunesinin görünür özgül ağırlığı $2,27 \text{ kg/dm}^3$ ile daha fazladır.
- 28 gün yaşında SRC harç numunesinin görünür boşluk oranı CEM I harç numunesine göre %0,84 oranında daha fazladır.
- 28 - 560 gün yaşları arasında CEM I harç numunesinin görünür boşluk oranı SRC harç numunesine göre %3,72 daha fazla oranda artmıştır. CEM I harç numuneleri SRC numunelerine göre 560 günlük süreçte daha fazla fiziksel hasara uğramıştır. Bu sebeple su emme ve boşluk oranı değerleri daha yüksek oranda elde edilmiştir.

560 günlük süreçte MgSO_4 çözeltisine maruz CEM I harç numunelerinin su emme deney sonuçlarına göre:

- Ağırlıkça su emme oranı %2,30 oranında artmıştır.

- Kuru özgül ağırlığı $0,11 \text{ kg/dm}^3$ ve %6,21 oranında artmıştır.
- Görünür özgül ağırlık $0,25 \text{ kg/dm}^3$ ve %12,38 oranında artmıştır.
- Görünür boşluk oranı %5,02 oranında artmıştır.

560 günlük süreçte MgSO_4 çözeltisine maruz SRC harç numunelerinin su emme deney sonuçlarına göre:

- Ağırlıkça su emme oranı %0,70 oranında artmıştır.
- Kuru özgül ağırlığı $0,15 \text{ kg/dm}^3$ ve %8,52 oranında artmıştır.
- Görünür özgül ağırlık $0,23 \text{ kg/dm}^3$ ve %11,27 oranında artmıştır.
- Görünür boşluk oranı %2,67 oranında artmıştır.

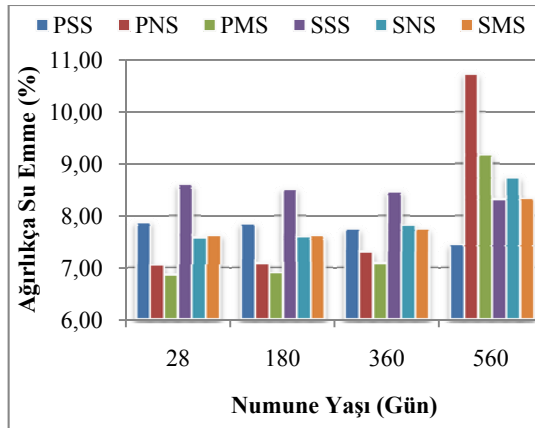
Elde edilen sonuçlara göre her iki çimento grubunda da tüm fiziksel özellikler artmıştır. Buna göre Na_2SO_4 çözeltisine maruz harçlarda olduğu gibi MgSO_4 çözeltisine maruz çimento harçlarında da gözeneklerde oluşan tuz kristalleri numunenin yoğunluğunu artırırken aynı zamanda etringit ve alçı oluşumu ile birlikte harçlarda çatlaklarla ve kırılmalarla birlikte oluşan hasar sonucunda görünür boşluk oranı yüksek oranda artmıştır.

MgSO_4 çözeltisine maruz 560 gün yaşında CEM I ve SRC harç numunelerinin su emme deneyleri sonuçlarının karşılaştırmaları:

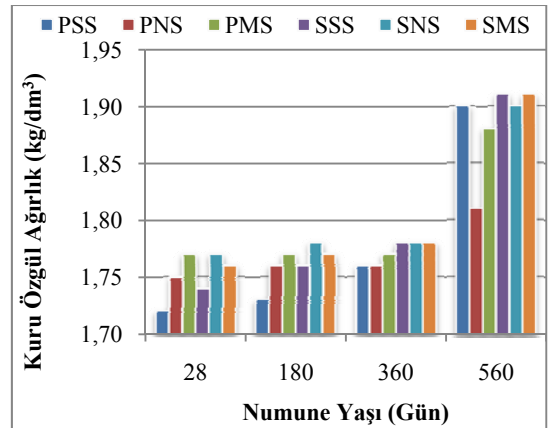
- CEM I harç numunelerinin ağırlıkça su emme oranı %2,3 daha fazla artmıştır.
- SRC harç numunelerinin kuru özgül ağırlığı $0,15 \text{ kg/dm}^3$ ile daha fazla artmıştır.
- CEM I harç numunelerinin görünür özgül ağırlığı $0,25 \text{ kg/dm}^3$ ile daha fazla artmıştır.
- CEM I harç numunelerinin görünür boşluk oranı %5,02 daha fazla artmış,
- CEM I harç numunesinin ağırlıkça su emme oranı %9,17 ile daha fazladır.
- SRC harç numunelerinin kuru özgül ağırlık ortalaması $1,91 \text{ kg/dm}^3$ ile daha fazladır.
- SRC ve CEM I harç numuneleri $2,27 \text{ kg/dm}^3$ ile eşit görünür özgül ağırlık ortalama değerine sahiptir.

- 28 gün yaşında SRC harç numunesinin görünür boşluk oranı %13,45 ile CEM I harç numunesine göre %1,27 oranında daha fazladır.
- 28 - 560 gün yaşları arasında CEM I harç numunesinin görünür boşluk oranı SRC harç numunesine göre %2,35 daha fazla oranda artmıştır.
- Elde edilen bu sonuçlar SRC harç numunelerinin CEM I harç numunelere göre içyapısında daha az hasar oluşturduğunu ve SRC çimentosunun CEM I çimentosuna göre $MgSO_4$ 'a karşı direncinin daha yüksek olduğunun bir göstergesidir.

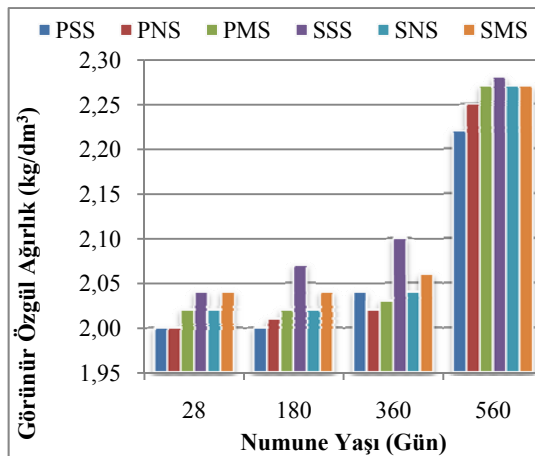
Her bir fiziksel özellik için elde edilen aritmetik ortalamalar Microsoft Office Excel 2007 paket programı kullanılarak Şekil 4.6'da sütun grafikleri olarak gösterilmiştir.



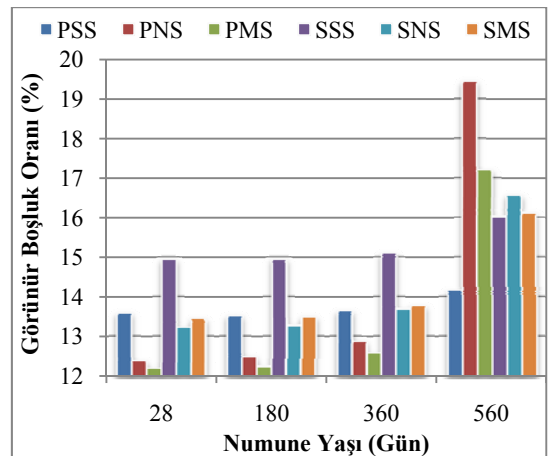
a. Ağırlıkça su emme – Numune Yaşı



b. Kuru özgül ağırlık – Numune Yaşı



c. Görünür özgül ağırlık – Numune Yaşı



d. Görünür boşluk oranı – Numune Yaşı

Şekil 4.6. Harç numunelerin fiziksel özellik – numune yaşı sütun grafikleri

Şekil 4.6'ya göre:

- Ağırlıkça su emme grafiğinde 28 gün yaşında en yüksek su emme oranı SSS, en az su emme oranı PMS'de elde edilmiştir. 560 gün yaşında ise en yüksek su emme oranı PNS en az su emme oranı SNS'de elde edilmiştir.
- Kuru özgül ağırlık grafiğinde 28 gün yaşında en yüksek kuru özgül ağırlık PMS, en az kuru özgül ağırlık PMS'de elde edilmiştir. 560 gün yaşında ise en yüksek kuru özgül ağırlık PSS, SSS ve SMS, en az kuru özgül ağırlık PNS' de elde edilmiştir.
- Görünür özgül ağırlık grafiğinde 28 gün yaşında en yüksek görünür özgül ağırlık SSS, en az görünür özgül ağırlık PSS'de elde edilmiştir. 560 gün yaşında ise en yüksek görünür özgül ağırlık SNS, en az görünür özgül ağırlık PSS' de elde edilmiştir.
- Görünür boşluk oranı grafiğinde 28 gün yaşında en yüksek görünür boşluk oranı SSS, en az görünür boşluk oranı PMS'ye aittir. 560 gün yaşında ise en yüksek görünür boşluk oranı PNS, en az görünür boşluk oranı PSS'ye aittir.

Harç numunelerden elde edilen veriler her bir numune için tekil olarak incelenmiştir. Su içinde bekletilen PSS ve SSS harç numuneleri için elde edilen deney sonuçlarına göre 28 gün ile 560 gün yaşlarında ölçülen suya doymuş ağırlık ile etüv kurusu ağırlık farklarının birbiri ile aynı olmasına (yaklaşık 12 gram) rağmen sudaki ağırlıkları arasında dikkate değer bir fark oluşmuştur. 560 gün yaşındaki numunelerin su içindeki ağırlıkları 28 gün yaşındaki numunelere göre yaklaşık olarak 9 gram fazladır. Bu durum sudaki numunelerin 560 gün yaşında katı madde miktarındaki artışı göstermektedir. Bu sebeple aynı zamanda özgül ağırlıklarda artmıştır. Su emme deneyleri sırasında PSS ve SSS harç numuneleri için hesaplanan ağırlıkça su emme oranlarının süreç ilerledikçe azalma eğilimi nedeninin malzeme içindeki katı madde oranının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [182]. Su içinde bekletilen harç numunelerde su emme oranı azalırken boşluk oranının artmasının sebebinin hidrasyon ürünlerinin yıkanması sonucunda agrega-çimento ara yüzlerinde oluşan boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir [183]. Agrega-çimento ara yüzünde

oluşan bu durum çimento harç numunelerinde Resim 4.13'te gösterildiği gibi çatlama davranışını oluşturmuştur.

Na_2SO_4 içinde bekletilen harç numunelerin su emme deney sonuçları tekil olarak incelendiğinde; PNS ve SNS harç numunelerinin 28 – 560 gün yaşları arasında suya doygun ağırlık ile etüv kurusu ağırlıkları farkı yaklaşık 6 g artmıştır. Ayrıca yine aynı yaşlar arasında sudaki ağırlıkları farkı ise yaklaşık 13 g artmıştır. Burada hesaplamalar neticesinde su emme miktarındaki artışın sebebinin numunedeki içsel çatlaklardan, sudaki ağırlığın artış sebebinin ise katı madde oranının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

MgSO_4 içinde bekletilen harç numunelerin su emme deney sonuçları tekil olarak incelendiğinde; PMS ve SMS harç numunelerinin 28 – 560 gün yaşları arasında suya doygun ağırlık ile etüv kurusu ağırlıkları farkı yaklaşık 5 g artmıştır. Ayrıca aynı yaşlar arasında sudaki ağırlıkları farkı ise yaklaşık 11 g artmıştır. Burada Na_2SO_4 'a maruz harçlarda olduğu gibi bir yaklaşım söz konusudur. Bu durum kuru ve görünür özgül ağırlıklarla desteklenmektedir. Su emme deneyleri yapılmış harç numunelerde zaman içinde aynı etkilere maruz diğer harç numunelere göre daha fazla bozulma gözlenmiştir. Bu fiziksel bozulmalar Resim 4.13'te gösterilmiştir.

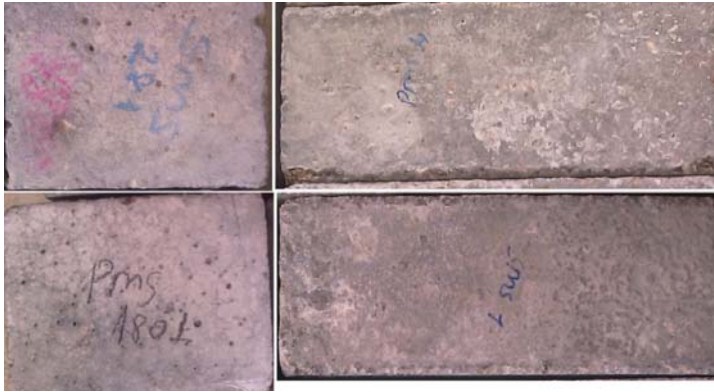
Resim 4.13'te gösterildiği gibi en fazla bozulmaya uğrayan numune grubu Na_2SO_4 'a maruz kalanlardır. 560 günlük süreç içinde MgSO_4 etkisinde kalan harç numunelerin dışında fiziksel olarak bir hasara rastlanılmamıştır. Ancak yakından incelendiğinde bu numunelerde harita çizgileri oluşmuştur. Su içinde bekleyen numunelerden bazıları resimde görüldüğü gibi 560 gün yaşında çatlama başlamıştır. Çatlayan kırık kısım resimde daha net görülebilmesi için dijital olarak serbest elle çizilerek belirginleştirilmiştir. Buna sebep olan mekanizmanın yıkanma mekanizması olduğu düşünülmektedir [183]. Resim 4.13'te görülen hasarların sebebinin özellikle ıslanma – kuruma çevrimlerinden kaynaklandığı ve bu etkinin hasar oluşumunu artırdığı düşünülmektedir.



390 gün yaşındaki SNS ve PNS



560 gün yaşındaki SNS ve PNS



390 gün yaşındaki SMS ve PMS

560 gün yaşındaki SMS ve PMS



390 ve 560 gün yaşındaki PSS ve SSS deney numuneleri

Resim 4.13. Su emme deneyi yapılmış harç numunelerin görüntüleri

Su emme deneyleri sırasında BT'ye giren 560 gün yaşındaki numuneler için de su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin sonuçları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. 560 gün yaşında BT’de görüntülenmiş numunelerin su emme deneyinden elde edilen sonuçlar

Numune Adı	Ağırlıkça su emme (%)	Kuru özgül ağırlık (kg/dm ³)	Görünür özgül ağırlık (kg/dm ³)	Görünür Boşluk Oranı (%)
PST	7,35	1,96	2,30	14,48
PMT	8,34	1,99	2,27	15,52
PNT	9,86	1,96	2,32	18,41
SST	7,57	1,96	2,30	14,84
SMT	7,47	2,00	2,25	14,95
SNT	7,74	2,04	2,30	15,52

Çizelge 4.7’ye göre su emme deneyi sonucunda en yüksek ağırlıkça su emme ve görünür boşluk oranı PNT numunelerinde elde edilmiştir. SNT ve PMT numunelerindeki görünür boşluk oranları birbirine eşit çıkmıştır. Ancak su emme oranları incelendiğinde, PMT numuneleri SNT’den %0,60 oranla daha fazla ağırlıkça su emmiştir. Deney sonuçlarına göre görünür boşluk oranları ile su emme oranları birbirleri ile orantılıdır. SRC çimento harçlarının CEM I çimento harçlarına göre daha az ağırlıkça su emme oranına sahip olduğu görülmüştür. 560 gün süreli üç tip kür koşulundan görünür boşluk oranları karşılaştırıldığında en az orana sahip olanlar PST ve SST numuneleridir. Bu diğer koşullara göre beklenen bir sonuçtur.

4.4. Kapiler su emme deneyi sonuçları

Kapiler su emme deneylerinden elde edilen sonuçlar tanımsal istatistik hesaplamalar yapılarak Çizelge 4.8’de verilmiştir. Çizelge 4.8’de elde edilen bulgulara göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- Tanımlayıcı istatistik bulgularına göre deney numunelerinin standart sapma değerleri 0,002 ile 0,029 arasındadır. Standart sapmalar dikkate alındığında elde edilen deney sonuçlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür.
- Kapiler su emme deney sonuçlarına göre 560 günlük süreçte bütün harç numunelerin 28 gün yaşına kadar kapiler su emme miktarı azalırken 28 – 270 gün yaşları arasında tüm harç numunelerin kapiler su emme değerleri değişik oranlarda artmıştır.

- PSK ve SSK harç numuneleri 2 – 28 gün yaşları arasında kapiler su emme miktarı sırasıyla %5,88 ve %1,22 oranında azalma gösterirken, 28 – 270 gün yaşları arasında PSK harç numuneleri %35,9 ve SSK harç numuneleri ise %11,1 artmıştır.
- PNK ve SNK harç numuneleri 2 – 28 gün yaşları arasında kapiler su emme miktarı sırasıyla %29,4 ve %36,6 oranında azalma gösterirken, 28 – 270 gün yaşları arasında PNK harç numuneleri %262,5 ve SNK harç numuneleri ise %105,8 artmıştır.
- PMK harç numuneleri 180 gün yaşına kadar kapiler su emme miktarlarında azalma gözlenmiş olup sonrasında 270 gün yaşına kadar yaklaşık %5 oranında artış göstermiştir. SMK harç numuneleri ise 2 – 28 gün yaşları arasında kapiler su emme miktarı %67,7 azalırken, 28 – 270 gün yaşları arasında %169,8 artmıştır.

Çizelge 4.8. Harç numunelerden elde edilen kapiler su emme deney sonuçları

Numune grubu	Bulgular	Numune yaşı (Gün)				Numune grubu	Bulgular	Numune yaşı (Gün)			
		2	28	180	270			2	28	180	270
PSK	n	4				SSK	n	4			
	μ (kg/m ² h ^{0.5})	0,136	0,128	0,151	0,174		μ (kg/m ² h ^{0.5})	0,164	0,162	0,171	0,180
	σ	0,006	0,007	0,007	0,007		σ	0,010	0,006	0,007	0,008
	En az	0,128	0,121	0,142	0,163		En az	0,156	0,154	0,162	0,170
	En çok	0,142	0,136	0,158	0,180		En çok	0,178	0,168	0,178	0,188
	Std. hata	0,003	0,004	0,003	0,002		Std. hata	0,051	0,003	0,007	0,011
PNK	n	4				SNK	n	4			
	μ (kg/m ² h ^{0.5})	0,136	0,096	0,201	0,348		μ (kg/m ² h ^{0.5})	0,164	0,104	0,139	0,214
	σ	0,006	0,007	0,016	0,029		σ	0,010	0,006	0,005	0,004
	En az	0,128	0,086	0,187	0,328		En az	0,156	0,098	0,132	0,206
	En çok	0,142	0,102	0,218	0,380		En çok	0,178	0,110	0,142	0,224
	Std. hata	0,003	0,004	0,003	0,002		Std. hata	0,051	0,010	0,02	0,030
PMK	n	4				SMK	n	4			
	μ (kg/m ² h ^{0.5})	0,136	0,099	0,095	0,100		μ (kg/m ² h ^{0.5})	0,164	0,053	0,096	0,143
	σ	0,006	0,009	0,002	0,010		σ	0,010	0,004	0,002	0,002
	En az	0,128	0,090	0,093	0,091		En az	0,156	0,048	0,093	0,135
	En çok	0,142	0,108	0,098	0,107		En çok	0,178	0,058	0,098	0,152
	Std. hata	0,003	0,005	0,001	0,006		Std. hata	0,051	0,002	0,001	0,001

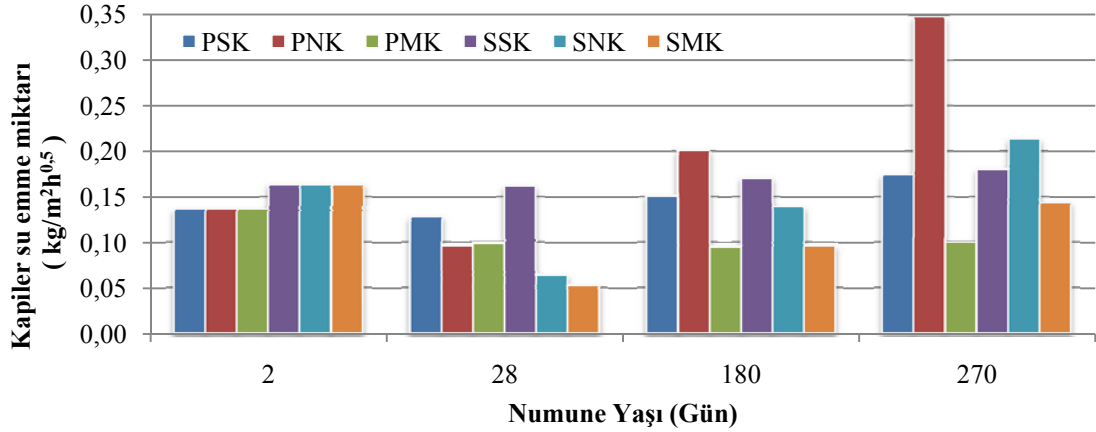
2 – 28 gün yaşları arasında kapiler su emme katsayılarının azalma nedeni literatürde belirtildiği gibi [1-11] çimento hamurunda oluşan reaksiyon ürünlerinin kılcal boşlukları doldurması sebebiyle olduğu, ileri yaşlarda kapiler su emme katsayısının artış sebebinin ise sudaki numuneler için tazelenen suyun harç numunelerde oluşturduğu yıkanma etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir [183]. Sülfat etkisindeki harç numunelerde artışın nedeni ise sülfatın içyapıda oluşturduğu kılcal çatlaklardan dolayı olduğu düşünülmektedir.

Kapiler su emme miktarının zamana bağlı gelişimleri ile makro boşluk gelişimi analizleri birbirine benzer ilişkide olduğu görülmüştür. Elde edilen bulgular Şekil 4.7’de sütun grafiğine dönüştürülerek veriler arasındaki farklar daha ayrıntılı şekilde vurgulanmıştır.

Şekil 4.7’deki grafiğe göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- Su içinde bekletilen referans numuneleri 270 günlük süreçte diğer kür metotlarına göre daha az kapiler su emmiştir. Bu sebeple kapiler su emme katsayıları diğer kürlere göre daha az oranla artış göstermiştir.
- 270 gün süreyle Na_2SO_4 çözeltisi içinde bekletilen harç numunelerin kapiler su emme miktarlarının diğerlerine göre en fazla oranda artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca 270 gün yaşındaki PNT harç numuneleri diğer gruplara göre en yüksek kapiler su emme miktarına sahiptir. Bunun sebebinin basınç dayanımlarıyla bağlantılı olduğu, harç numunelerin içyapılarında gelişen çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.
- 2 gün yaşındaki SRC harç numunelerinin kapiler su emme miktarları diğerlerine göre en fazla olduğu görülmektedir.
- Zamana bağlı olarak kapiler su emme miktarındaki artış açısından en yavaş gelişim gösteren numune grubu PMT’dir.
- 28 gün yaşında SMK ve 270 gün yaşında PMK harç numunelerinin en az kapiler su emme miktarına ulaştığı görülmektedir. Bunun sebebinin MgSO_4 çözeltisi içinde bekletilen numunelerde daha fazla kristal ürün oluştuğu ve sonuçta daha fazla oranda kapiler boşluğu kapatarak yapıya sıvı maddenin girmesini

engellediği, bununla birlikte daha öncede değinildiği gibi numune yüzeylerinde oluşan brusit tabakasının kapiler su emmeyi azalttığı düşünülebilir.

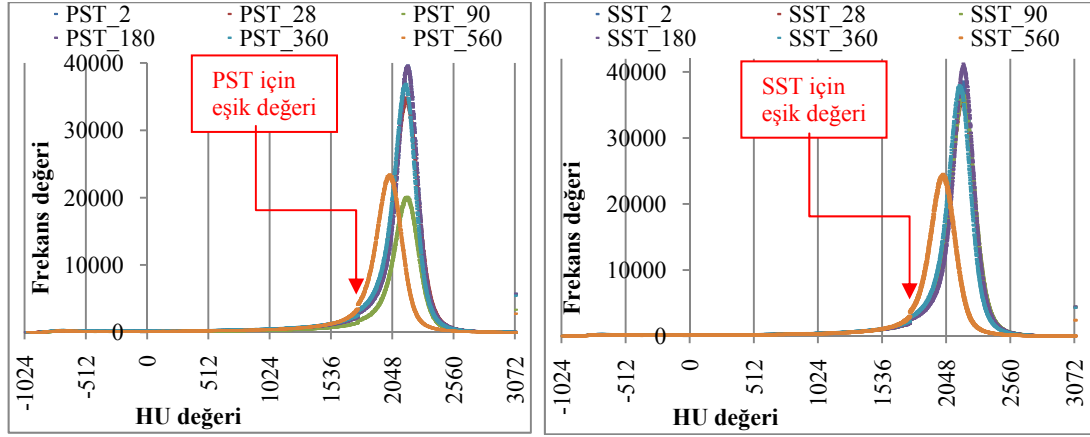


Şekil 4.7. Kapiler su emme deneyi verilerinin numune yaşına bağlı değişim grafiği

4.5. Bilgisayarlı Tomografi yöntemiyle hava boşluklarının gelişim analizi

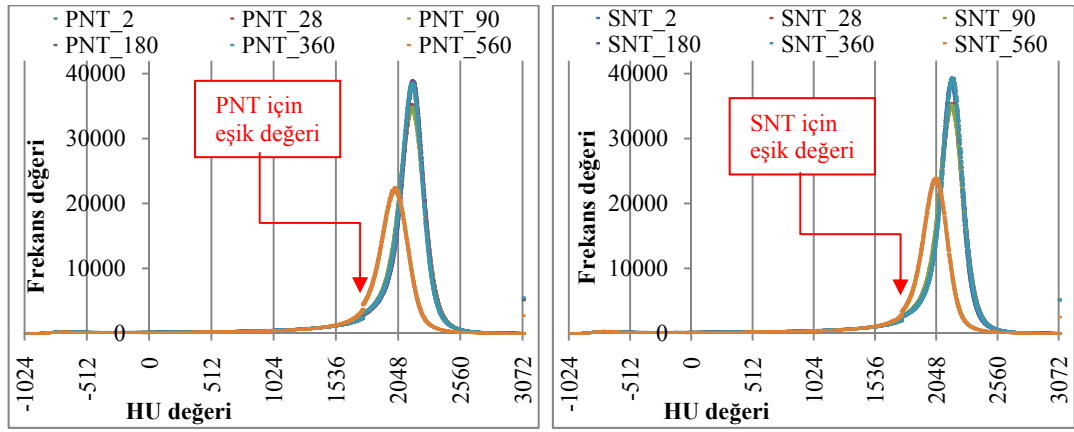
Sülfata maruz çimento harçlarındaki hava boşluklarının gelişimi Bölüm 3.2.4’te anlatıldığı gibi BT metodu ile Matlab v.10a yazılımı ve 3D Doctor v.4.02 paket programı kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada özellikle ayrıştırılmış verilerin programlara tanımlanabilmesini sağlamak amacıyla özel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada literatüre bağlı kalınarak, diğer çalışmalarda da kullanılan yöntemlerde “eşik” tanımlaması yapılmıştır. Literatürde BT görüntülerinde katı cisimlerde porozite analizi ile ilgili yapılan çalışmalarda, katı kısım ile hava boşluklarını ayırmak için “threshold (eşik)” kavramı açıklanmıştır. Eşik değeri tomografilerdeki HU değerlerinin frekans eğrisinde normal dağılım oluşturması sırasında eğrinin kopma yaptığı ya da sıçrama yaptığı noktalara eşdeğer olan HU değeri yada değerleridir [181]. Bu nedenle BT görüntülerinde makro boşluk oranını hesaplayabilmek için bir sıçrama “graytresh” değerine ihtiyaç vardır. Bu değerlerin hesaplanabilmesi için görüntülenen harç numunelerin tüm kesitlerinden elde edilen tüm piksel değerleri bir frekans eğrisine yerleştirilmeli ve sıçrama noktaları aralık olarak tespit edilmelidir. Bu amaçla 3D Doctor v.4.02 paket programı yardımıyla numunelerin 2, 28, 90, 180,

360 ve 560 gün yaşlarında harçın çevrelediği görüntü alanındaki tüm piksel değerleri seçilerek Excel paket programı ile Şekil 4.8 oluşturulmuştur [156].



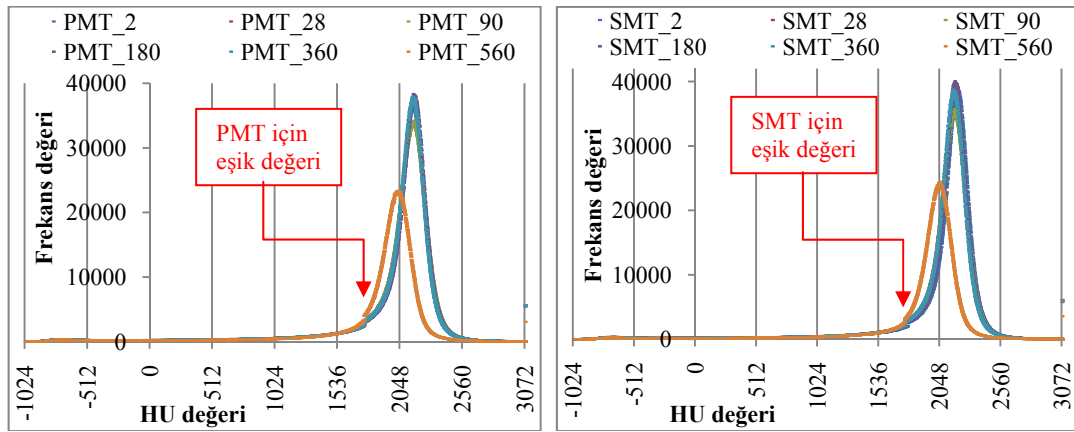
a. PST numunesi için

b. SST numunesi için



a. PNT numunesi için

b. SNT numunesi için



a. PMT numunesi için

b. SMT numunesi için

Şekil 4.8. CEM I ve SRC harç numuneleri için HU dağılım eğrileri

Şekillerden de görüleceği gibi BT görüntülerinin eşik HU değerleri 1740 – 1760 arasında değişmektedir. Bu değerler arasında kalan herhangi bir değer, eşik değeri olarak kabul edilebilir. Bu yaklaşımla Matlab yazılımında makro boşluk oranını bulabilmek için HU eşik değeri 1750 olarak seçilmiştir. Buna göre elde edilen makro boşluk oranları CEM I harç numuneleri için Çizelge 4.9’da ve SRC harç numuneleri için Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Matlab’ten elde edilen CEM I harç numunelerinin makro boşluk oranı gelişimleri

Numune kodları	Numune yaşları (Gün) – Hava boşluklarının miktarları (%)													
	2	7	14	21	28	70	90	120	150	180	270	360	390	560
PST1	12,9	12,5	12,3	12,0	11,9	11,7	11,6	11,4	11,5	11,5	11,6	13,2	13,2	15,1
PST2	13,1	12,6	12,5	12,3	12,2	12,2	12,1	12,2	12,3	12,5	12,6	13,3	14,0	16,5
PST_{ort}	13,0	12,6	12,37	12,1	12,0	11,9	11,9	11,8	11,9	12,0	12,1	13,2	13,6	15,8
PMT1	13,1	13,0	12,9	12,9	12,8	12,9	12,8	12,9	12,9	13,0	12,9	13,2	13,7	17,1
PMT2	13,0	12,8	12,8	12,6	12,4	12,0	12,1	12,1	12,0	12,1	12,1	12,5	12,9	17,6
PMT3	12,4	12,4	12,1	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,4	12,6	15,6
PMT_{ort}	12,8	12,5	12,6	12,5	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,4	12,7	13,0	16,8
PNT1	12,2	12,1	12,0	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,8	11,7	12,0	12,1	18,4
PNT2	12,2	12,1	12,1	12,0	11,9	11,6	11,8	11,6	11,6	11,5	11,5	11,9	12,1	20,9
PNT3	13,2	13,1	12,8	12,8	12,9	13,0	13,0	12,9	12,9	13,0	12,9	13,2	13,5	19,1
PNT_{ort}	12,6	12,4	12,3	12,2	12,2	12,2	12,2	12,1	12,1	12,1	12,0	12,4	12,6	19,5

Çizelge 4.9’da verilen CEM I harç numunelerin makro boşluk oranı gelişimi sonuçlarına göre:

- PST harç numunelerin makro boşluk oranları 120 gün yaşına kadar azalarak, sonrasında 270 gün yaşına kadar düşük oranlı bir artışla, 270 gün yaşından sonra daha hızlı bir artışla gelişimine devam etmiştir.
- PST harç numunelerinin 2 gün yaşında ortalama %13 olan makro boşluk oranı 120 gün yaşında yaklaşık %11,8 oranında azalarak %11,8’e düşmüştür.
- 120 – 270 gün yaşları arasında PST harç numunelerinin makro boşlukları her bir 30 günlük süreçte %0,1 oranında artarak %12,1 oranına ulaşmış ve sonrasında hızlı bir oranda artış göstererek 560 gün yaşında ilk ölçüme göre %2,8 oranında

artış göstermiştir. Bu sonuç su emme deney verileri ile yaklaşık %1'lik farkla örtüşmektedir.

- PST harç numunelerin makro boşluk oranı özellikle 2 - 28 gün yaşları arasında %1 oranı ile en hızlı azalma gelişimini gösterirken, 270 – 560 gün yaşları arasında %3,7 oranı ile en hızlı artma gelişimini göstermiştir.
- CEM I harç numuneleri için hesaplanan makro boşluk oranlarının gelişiminde en düşük oran PST numunelerinde görülmüştür.
- $MgSO_4$ çözeltisi içinde bekletilen CEM I harç numunelerin 2 – 70 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %0,5 azalma gösterirken, 70 - 180 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları sabitleşmiştir.
- PMT harç numuneleri 180 – 360 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %0,4 mertebesinde artış göstermiştir. Son 360 – 560 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %4,1 mertebesinde yüksek oranda artış göstermiştir.
- PMT harç numuneleri 2 gün yaşında ortalama %12,8 olan makro boşluk oranı 180 gün yaşında %0,5 azalarak ortalama %12,3, 270 gün yaşında %0,1 artarak ortalama %12,4 ve 560 gün yaşında %4,4 artarak ortalama %16,8 oranına ulaşmıştır. PMT harç numunesi için 560 gün yaşında su emme deneylerinden hesaplanan ortalama görünür boşluk oranı %15,52 çıkmıştır. BT sonuçları ile görünür boşluk oranı arasında yaklaşık %1,3 mertebesinde bir oran gözlenmiştir.
- PMT numunelerinin makro boşluk oranları ilk ölçüm yaşındaki orana göre %4 oranında artış göstermiştir.
- Na_2SO_4 çözeltisi içinde bekletilen CEM I harç numunelerin 2 – 21 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %0,3 azalma gösterirken, 21 - 270 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %0,2 oranında azalmıştır. Sonrasında 270 – 390 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %0,6 mertebesinde artış göstermiştir. Son 390 – 560 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %6,9 mertebesinde yüksek oranda artış göstermiştir.
- 2 gün yaşında ortalama %12,6 olan makro boşluk oranı 270 gün yaşında %0,6 oranında azalarak ortalama %12'ye, 360 gün yaşında ortalama %0,6 oranında artarak %12,6 ve 560 gün yaşında %6,9 oranında artarak ortalama %19,5 oranına ulaşmıştır.

- Su emme deneyleri çerçevesinde PNT harç numunesi için 560 gün yaşında hesaplanan ortalama görünür boşluk oranı %18,41 çıkmıştır. görünür boşluk oranı hesaplamaları ile BT ile makro boşluk oranı verileri arasında yaklaşık %1’lik bir oranda yakınlık gözlenmiştir.
- PNT numunelerinin makro boşluk oranları ilk ölçüm yaşındaki orana göre %6,9 oranında artış göstermiştir.
- Makro boşluk oranı gelişiminde en yüksek artış %6,9 oranı ile PNT harç numunelerinde, sonrasında %4,4’lük oranla PMT ve %2,8 ile PST numunelerinde gözlenmiştir.

Çizelge 4.10. Matlab’ten elde edilen SRC harç numunelerinin makro boşluk gelişimleri

Numune kodları	Numune yaşları (Gün) – Hava boşluklarının miktarları (%)													
	2	7	14	21	28	70	90	120	150	180	270	360	390	560
SST ₁	11,2	10,8	10,7	10,6	10,5	10,2	10,2	10,1	10,4	10,3	10,4	11,8	11,7	13,4
SST ₂	12,1	11,6	11,5	11,3	11,1	10,6	10,2	10,0	10,4	10,5	10,8	11,2	11,6	13,6
SST _{ort}	11,7	11,2	11,1	10,9	10,8	10,4	10,2	10,0	10,4	10,4	10,6	11,5	11,6	13,5
SMT ₁	11,4	11,2	11,1	11,0	10,8	10,5	10,5	10,5	10,6	10,5	10,5	10,8	11,3	13,8
SMT ₂	12,6	12,4	12,4	12,4	12,0	11,6	11,4	11,2	11,3	11,7	11,7	12,0	12,5	14,9
SMT ₃	16,2	16,0	15,9	15,9	15,9	16,0	16,2	16,1	16,2	16,1	16,2	16,7	16,6	19,9
SMT _{ort}	13,4	13,2	13,1	13,1	12,9	12,7	12,7	12,6	12,7	12,8	12,8	13,2	13,5	16,2
SNT ₁	11,9	11,8	11,7	11,5	11,3	11,0	11,1	11,0	11,0	10,9	10,8	11,1	11,3	15,5
SNT ₂	11,8	11,6	11,6	11,6	11,4	11,2	11,3	11,3	11,3	11,1	10,7	11,4	11,6	16,6
SNT ₃	12,6	12,1	12,2	12,2	12,1	12,0	12,1	12,1	12,2	12,3	12,2	12,4	12,5	16,3
SNT _{ort}	12,1	11,8	11,8	11,8	11,6	11,4	11,5	11,5	11,5	11,4	11,2	11,6	11,8	16,1

Çizelge 4.10’da verilen SRC harç numunelerin makro boşluk oranı gelişimi sonuçlarına göre:

- SST harç numunelerin makro boşluk ortalama oranları 120 gün yaşına kadar azalmakta, sonrasında 150 gün yaşına kadar düşük bir artışla 180 gün yaşına kadar sabitleşmiş, 180 gün yaşından sonra 390 ve 560 yaşlarına kadar daha hızlı bir artışla gelişimine devam etmiştir.
- SST harç numunelerin 2 gün yaşında ortalama %11,7 olan makro boşluk oranı 28 gün yaşında yaklaşık ortalama %0,9 oranında azalmış, sonrasında 28 – 120 gün

yaşları arasında ortalama %0,9 oranında azalarak ortalama %10'a gerilemiştir. 120 gün yaşından sonra 150 yaşına kadar ortalama %0,4, sonra sabitlenip tekrar 180 yaşından sonra 270, 360 ve 560 gün yaşlarında sırasıyla ortalama %0,2, %1,1 ve %2,1 oranlarında makro boşluk oranı artmıştır.

- SST harç numuneleri 560 gün yaşında ilk ölçüme göre ortalama %1,8 oranında makro boşluklar artış göstermiştir. Bu sonuç su emme deney verileri ile yaklaşık %1'lik farkla örtüşmektedir.
- SST harç numunelerin makro boşluk oranı özellikle 2 - 28 gün yaşları arasında %0,9 oranı ile en hızlı azalma gelişimini gösterirken, 390 – 560 gün yaşları arasında %1,9 oranı ile en hızlı artma gelişimini göstermiştir.
- $MgSO_4$ çözültisi içinde bekletilen SRC harç numunelerin 2 – 120 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %0,8 azalma gösterirken, 120 - 180 gün yaşları arasında ortalama %1'lik artışla sabitlenmiştir.
- SMT harç numuneleri 270 – 360 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %0,4 mertebesinde artış göstermiştir. Son 360 – 560 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %3 mertebesinde yüksek oranda artış göstermiştir.
- SMT harç numuneleri 2 gün yaşında ortalama %13,4 olan makro boşluk oranı 120 gün yaşında %0,8 azalarak ortalama %12,6, 150 ve 180 gün yaşında %0,1'er artarak ortalama %12,8, 360, 390 ve 560 gün yaşında sırasıyla %0,4, %0,7 ve %3,4 artarak en son ortalama %16,2 oranına ulaşmıştır. SMT harç numunesi için 560 gün yaşında su emme deneylerinden hesaplanan ortalama görünür boşluk oranı ortalama %14,95 çıkmıştır. BT sonuçları ile görünür boşluk oranı arasında yaklaşık %1,3 mertebesinde bir oran gözlenmiştir.
- SMT numunelerinin makro boşluk oranları ilk ölçüm yaşındaki orana göre %2,8 oranında artış göstermiştir.
- Na_2SO_4 çözültisi içinde bekletilen SRC harç numunelerin 2 – 28 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %0,5 azalma gösterirken, 28 - 270 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %0,4 oranında azalmıştır. Sonrasında 270 – 390 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %0,6 mertebesinde artış göstermiştir. Son 390 – 560 gün yaşları arasında ortalama makro boşluk oranları %4,3 mertebesinde yüksek oranda artış göstermiştir.

- SNT harç numunelerinin 2 gün yaşında ortalama %12,1 olan makro boşluk oranı ortalama 270 gün yaşında %0,9 oranında azalarak ortalama %11,2'ye, 360 gün yaşında ortalama %0,5 oranında azalarak %11,6 ve 560 gün yaşında %4 oranında artarak ortalama %16,1 oranına ulaşmıştır.
- Su emme deneyleri çerçevesinde PNT harç numunesi için 560 gün yaşında hesaplanan ortalama görünür boşluk oranı %15,52 çıkmıştır. Görünür boşluk oranı hesaplamaları ile BT ile makro boşluk oranı verileri arasında yaklaşık %0,5'lik bir oranda sapmayla yakınlık gözlenmiştir.
- SNT harç numunelerinin makro boşluk oranları ilk ölçüm yaşındaki orana göre %4 oranında artış göstermiştir.
- Makro boşluk oranı gelişiminde en yüksek artış ortalama %4 oranı ile PNT harç numunelerinde, sonrasında %2,8'lik oranla SMT ve son olarak %1,8 ile SST harç numunelerinde gözlenmiştir.

Su içinde bekleyen PST ve SST harç numuneleri için erken yaşlarda gelişen makro boşluk oranındaki azalmanın sebebi; çimento harcının *bir kısım* gözenek çeperinde oluşan portlandit kristalleri sebebiyle gözenek yoğunluğunun artması sonucunda BT'de elde edilen görüntüdeki boşlukların piksel değerleri de artarak eşik değeri üstüne çıkması ile boşluk oranı azalmış gibi görülmektedir. İleri yaşlarda gelişen makro boşluk oranındaki artmanın sebebi ise; belli süreçlerde değişen kür suyunun gözeneklerdeki portlandit ve oluşan diğer kristal yapıları yıkaması ve kür suyuna çıkarması sebebiyle gözeneklerdeki yoğunluğun düşmesiyle birlikte BT'de elde edilen görüntüdeki boşlukların piksel değerleri de azalarak eşik değerinin altına inmesi sonucunda makro boşluk oranının artmış gibi görüldüğü düşünülmektedir. Ancak su içinde bekletilen harç numunelerin ileri yaşlarda makro boşluk oranındaki artışın sebebinin aynı zamanda numuneyi etkileyen x-ışını radyasyonu sebebiyle olduğu düşünülmektedir. Bu yaklaşımı desteklemek amacıyla ve su içinde bekletilen harç numunelerdeki HU değeri gelişimlerini inceleme amacıyla harç numuneler için zamana dayalı HU değeri değişim analizi yapılmıştır. Bu analiz numunelerdeki eşik değeri üstünde kalan ve katı kısmı sembolize eden piksel değerlerinin tanımsal istatistik bilgilerinden oluşmaktadır. Tanımsal istatistik bilgiler aritmetik ortalama (μ), standart sapma (σ), Değişim katsayısı (C_{vX}), %95 güven aralığı ve standart hata

olarak verilmiştir. Elde edilen bu istatistik sonuçlar Çizelge 4.11’de, HU değerlerinin ortalamaları Şekil 4.9’da regresyon denklemleri, eğrileri ile R^2 değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.11. X-ışını almış numunelerin HU değerlerinin zamana bağlı gelişimi

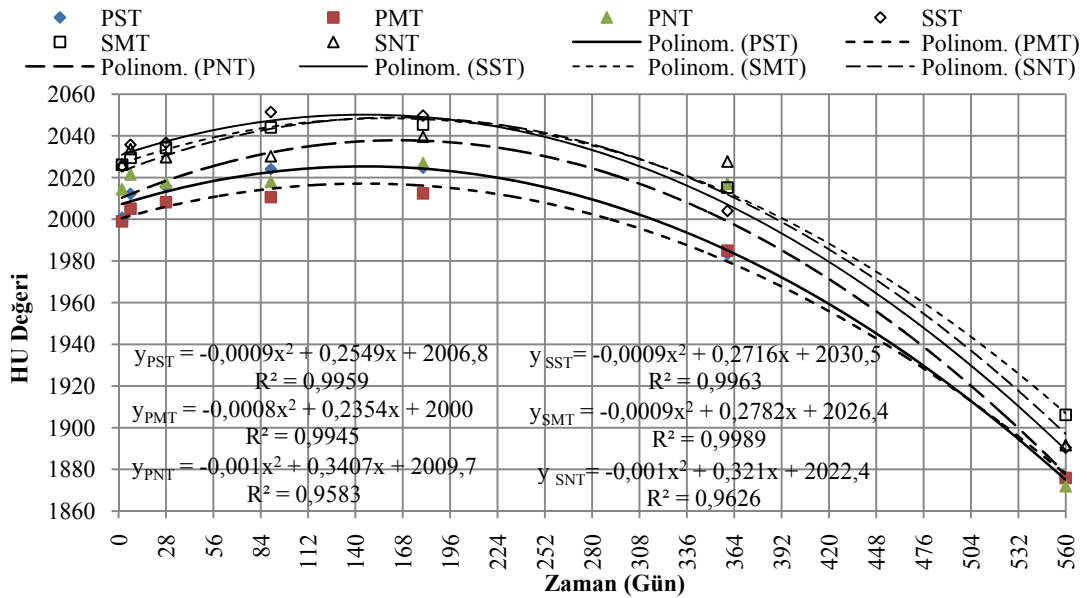
Numune kodu	İstatistik	2 gün	7 gün	28 gün	90 gün	180 gün	360 gün	560 gün
PST	μ	2001	2012	2016	2024	2025	1983	1876
	σ	24,87	24,71	23,84	22,48	21,62	24,02	21,84
	Cyx	1,24	1,23	1,18	1,11	1,07	1,21	1,16
	N	508	508	506	400	400	400	244
	A	49,74	49,42	47,68	44,96	43,24	48,04	43,69
	%95 güven aralığı	1951 2050	1963 2062	1968 2063	1979 2069	1981 2068	1935 2031	1832 1919
	Std. Hata	1,56	1,55	1,50	1,63	1,57	1,72	2,13
PMT	μ	1999	2005	2008	2011	2012	1985	1876
	σ	24,68	24,87	24,49	23,47	23,27	23,20	24,03
	Cyx	1,23	1,24	1,22	1,17	1,16	1,17	1,28
	N	508	508	506	400	400	400	244
	A	49,36	49,74	48,97	46,95	46,53	46,40	48,06
	%95güven aralığı	1950 2048	1955 2055	1959 2057	1964 2058	1966 2059	1939 2031	1828 1924
	Std. Hata	1,55	1,56	1,54	1,69	1,67	1,67	2,29
PNT	μ	2014	2021	2018	2018	2027	2017	1872
	σ	25,46	24,74	24,70	21,95	21,91	22,53	22,84
	Cyx	1,26	1,22	1,22	1,09	1,08	1,12	1,22
	N	508	508	506	400	400	400	244
	A	50,92	49,48	49,40	43,89	43,82	45,06	45,69
	%95güven aralığı	1963 2065	1972 2071	1968 2067	1974 2062	1983 2071	1972 2062	1826 1918
	Std. Hata	1,60	1,55	1,55	1,59	1,58	1,65	2,16
SST	μ	2025	2036	2037	2051	2050	2004	1890
	σ	25,27	23,53	22,77	19,67	20,41	23,36	19,92
	Cyx	1,25	1,16	1,12	0,96	1,00	1,17	1,05
	N	506	506	506	416	416	416	258
	A	50,54	47,06	45,54	39,34	40,83	46,73	39,84
	%95 güven aralığı	1975 2076	1989 2083	1991 2082	2012 2091	2009 2091	1957 2051	1851 1930
	Std. Hata	1,59	1,48	1,43	1,39	1,44	1,64	1,82
SMT	μ	2026	2029	2034	2044	2045	2015	1906
	σ	24,09	23,90	22,75	19,99	20,06	21,95	19,41
	Cyx	1,19	1,18	1,12	0,98	0,98	1,09	1,02
	N	506	506	506	416	416	416	258
	A	48,18	47,81	45,51	39,98	40,12	43,90	38,82
	%95 güven aralığı	1978 2074	1982 2077	1989 2080	2004 2084	2005 2086	1971 2059	1867 1945
	Std. Hata	1,51	1,50	1,43	1,41	1,42	1,55	1,79
SNT	μ	2026	2034	2030	2030	2040	2028	1892
	σ	28,15	26,80	26,83	26,01	24,91	25,56	23,05
	Cyx	1,39	1,32	1,32	1,28	1,22	1,26	1,22
	N	506	506	506	416	416	416	258
	A	56,31	53,60	53,66	52,01	49,82	51,11	46,11
	%95 güven aralığı	1970 2083	1980 2087	1976 2083	1978 2082	1990 2089	1977 2079	1846 1938
	Std. Hata	1,77	1,69	1,69	1,82	1,75	1,80	2,11

Suda, Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltisinde bekletilmiş ve x-ışınına maruz kalan CEM I ve SRC harç numunelerin zamana dayalı HU değişimi istatistik analizi çizelgesinde başlangıçta yaklaşık CEM I harç numunelerinin analizinde 508, SRC harç numunelerinin analizinde 506 kesitten elde edilen ortalama değerler, sonraki süreçlerde numunelerin basınç dayanım deneylerinin yapılabilmesi için kesilmesi sebebiyle kesit miktarları azalmıştır. 90 gün yaşında CEM I harç numunelerinin analizinde 400, SRC harç numunelerinin analizinde 416 kesit üzerinden ve 560 gün yaşında CEM I harç numunelerinin analizinde 244 ve SRC harç numunelerinin analizinde 258 kesit üzerinden istatistik hesaplar yapılmıştır. İstatistik hesaplara göre:

- Tüm harç numunelerin HU değerleri 180 gün yaşına kadar artış göstermiş sonrasında azalmıştır.
- Tüm harç numunelerin HU değerleri yaklaşık olarak 2000 civarlarındadır.
- Tüm harç numunelerin 560 gün sonucundaki HU değerleri 1900 civarlarına gerilemiştir.
- Harçlar içinde ortalama HU değerinin en yüksek değerini SRC harç numunelerinde elde etmiştir.
- PST harç numunelerinin 2 gün yaşındaki ortalama HU değeri (BT yoğunluğu) 2001, 560 gün yaşındaki ortalama HU değeri 1876 olarak belirlenmiştir. 2 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %6,2 oranında azalmıştır. 2 – 180 gün yaşları arasındaki HU değerleri %1,2 oranında artmıştır. 180 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %7,4 oranında azalmıştır.
- PMT harç numunelerinin 2 gün yaşındaki ortalama HU değeri (BT yoğunluğu) 1999, 560 gün yaşındaki ortalama HU değeri 1876 olarak belirlenmiştir. 2 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %6,1 oranında azalmıştır. 2 – 180 gün yaşları arasındaki HU değerleri %0,6 oranında artmıştır. 180 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %6,8 oranında azalmıştır.
- PNT harç numunelerinin 2 gün yaşındaki ortalama HU değeri (BT yoğunluğu) 2014, 560 gün yaşındaki ortalama HU değeri 1872 olarak belirlenmiştir. 2 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %7,1 oranında azalmıştır. 2 – 180 gün yaşları

arasındaki HU değerleri %0,6 oranında artmıştır. 180 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %7,7 oranında azalmıştır.

- SST harç numunelerinin 2 gün yaşındaki ortalama HU değeri (BT yoğunluğu) 2025, 560 gün yaşındaki ortalama HU değeri 1890 olarak belirlenmiştir. 2 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %6,7 oranında azalmıştır. 2 – 180 gün yaşları arasındaki HU değerleri %1,2 oranında artmıştır. 180 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %7,8 oranında azalmıştır.
- SMT harç numunelerinin 2 gün yaşındaki ortalama HU değeri (BT yoğunluğu) 2026, 560 gün yaşındaki ortalama HU değeri 1906 olarak belirlenmiştir. 2 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %5,9 oranında azalmıştır. 2 – 180 gün yaşları arasındaki HU değerleri %0,9 oranında artmıştır. 180 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %6,8 oranında azalmıştır.
- SNT harç numunelerinin 2 gün yaşındaki ortalama HU değeri (BT yoğunluğu) 2026, 560 gün yaşındaki ortalama HU değeri 1892 olarak belirlenmiştir. 2 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %6,6 oranında azalmıştır. 2 – 180 gün yaşları arasındaki HU değerleri %0,7 oranında artmıştır. 180 – 560 gün yaşları arasındaki HU değerleri %7,2 oranında azalmıştır.



Şekil 4.9. Suda, Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltisinde bekletilmiş x-ışınına maruz harç numunelerinin HU gelişimi regresyon grafikleri, denklemleri ve R^2 değerleri

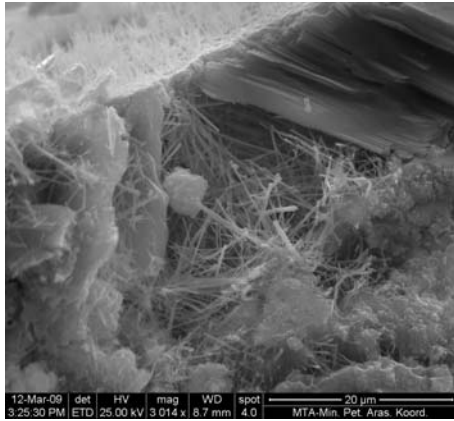
Şekil 4.9'a göre sülfata maruz harçlar için elde edilen HU değerlerinde ikinci dereceden denklemlerin R^2 değerleri 0,99 değerinde hesaplanmıştır. Buna göre sülfata maruz harçların 560 gün süreyle HU değerlerinin gelişimleri için elde edilen veriler %99 oranında gerçekliğe sahiptir denilebilir. Suda kürü yapılan harçlar için elde edilen R^2 değerleri 0,96 olarak hesaplanmıştır. Buna göre suda kürü yapılan harçlar için elde edilen HU verilerinin gerçekliği %96 mertebesinde dir.

Şekil 4.9'daki eğriler incelendiğinde CEM I ve SRC harç numunelerinin suda ve sülfat çözeltilerindeki davranışları çok az bir farklılıkla benzerlik göstermektedir. Harçların HU değerlerinde zamana bağlı gelişimleri ilk 130 gün yaşına kadar artış eğrisi oluşturmakta, sonrasında HU değerleri hızla düşmektedir. Bu davranış sülfata maruz harç numunelerin basınç dayanımı gelişimlerine yakın benzerlik göstermektedir. Ancak su içinde kürü yapılan referans numunelerinde HU değerlerindeki azalmanın sebebinin x-ışınının iyonizan etkisine bağlı olduğu düşünülmektedir. Tekin daha önceki çalışmasında [33], BT ile görüntülenmiş belli miktarda radyasyon etkisinde kalmış suda kürü yapılmış 100 gün yaşındaki harç numunelerin basınç dayanımlarında radyasyon etkisinde olmayan numunelere göre daha düşük basınç dayanımı değerlerine ulaşıldığını gözlemlemiştir. Bu durumun BT'deki x-ışınının iyonizan etkisinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Ayrıca Bu çalışma dayanımdaki kaybın aynı zamanda malzemenin atomik yoğunluk kaybına da sebep olduğunu göstermektedir.

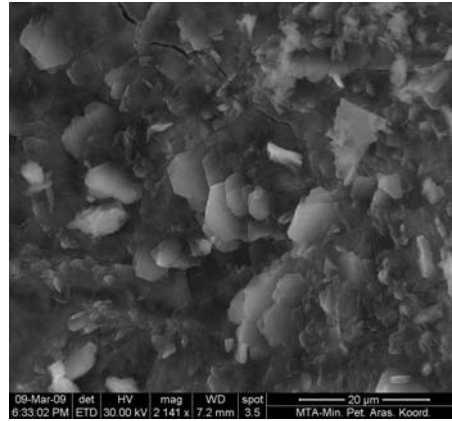
Su içinde bekleyen çimento harç numunelerinin makro boşluk gelişimleri incelendiğinde her çimento numunesindeki hava boşluklarının muhtelif oranlarda azaldığı görülmüştür. Boşluk gelişimleri ile ilgili çalışmalardan Tekin ve arkadaşlarının [33] 100 gün süreli çalışmasında CEM I harç numunelerinin ilk 7 günlük süreçte hızlı bir gelişme göstererek boşluk alanlarının azaldığı, sonraki süreçte boşluk alanındaki azalmanın azalarak sürdüğü belirlenmiştir. Salgueiro ve arkadaşlarının [182] çalışmalarında ise 360 günlük bir değerlendirme yapılmıştır. Buna göre 360 günlük süreçte çimento harçlarındaki boşluk alanı azalma eğilimlidir. Bu çalışmalarda boşluk gelişimleri gözeneklere dolan kür suyunun çimentodaki serbest kireci sürükleyerek Ca(OH)_2 'ye dönüşmesi şeklinde açıklanmıştır.

Gözeneklerdeki kapanma eğilimi çimentodaki katı hacmin gelişimi ile değil serbest kirecin suyla girdiği reaksiyon sonucu oluşturduğu portlanditin kristal halde gözenek içine çökmesi ile açıklanmıştır [182]. Her iki tip çimento için su kürü yapılan numunelerin boşluk gelişimlerinin benzer olduğu gözlenmiştir. Buna göre su içinde kür yapılan harç numunelerin hava boşluğu oranları 120 gün yaşına kadar azalmış, sonrasında artış eğilimine girmiştir. Numunelerin boşluk oranlarındaki azalma literatürde açıklandığı gibi portlandit kristallerinin boşluklar içinde çökmesi sonucunda boşlukların çeperlerindeki katı kısmın artması ve bundan dolayı gözenek yoğunluğunun artması ile açıklanırken [182], belli bir yaştan sonra boşluk hacmindeki azalmalar için ise boşluk çeperlerine çökelen portlanditin yıkanarak kür suyuna karışması ile kür suyunun pH değerini yükseltmesi ile açıklanmaktadır [11, 182]. Bu süreç çimentolu sistemlerde düşük pH'lı kür suyunun gözeneklere dolarak oradaki hidratasyon ürünlerini yıkaması ve böylece pH'ı 13 seviyelerinde olan çimento hamuru hidratlarının hidrolizine öncülük etmektedir. malzemenin yüzeyinden çözülmüş agresif kimyasalların taşınması ile birlikte gelişen bu hidroliz süreci çimento hamuru porozitesinin artışı için önemli bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak sıvı ve gaz taşınma özellikleri artar ve mekanik dayanım azalır. Agresif çözeltinin etkileri altında (deiyonize su veya amonyum nitrat çözeltisi) hidroliz olayları yüzeyden malzemenin içine doğru agresif kimyasalların difüzyonu ile gelişir. Çözülen ürünler malzemenin dışına taşınır. Böylece yıkanma süreci numunenin dışından difüzyon ile devam eder. Boşluk çözeltisinin pH'ının azalması ile kararsızlaşan hidratlardan ilk örneği portlandit olarak bilinen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yıkanır ve çözülerek gözenek dışına taşınır. Portlanditin tamamen çözülmesinden sonra C-S-H molekülünün çözünme süreci başlar. Portlanditin çözülmesi kapiler porozitenin artışı ile önemli derecede ilgilidir. Bu çözülmenin asıl sonucu yüksek oranda porozite artışıdır. Kalsiyum kaybına sebep olan yıkanmanın artırdığı porozite ile ilgili birçok çalışma vardır. Portlanditten sonra C-S-H'nin çözülmesi sonucunda porozitede önemli olmayan çok küçük oranlarda değişim olmaktadır [183].

PST ve SST harç numunelerinin üzerinden koparılan 1 cm çaplı örneklerin hava boşluklarında tarayıcı elektron mikroskobu ile çeşitli süreçlerde görüntüleme yapılmıştır. Örnek SEM fotoğrafları Resim 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17'de gösterilmiştir.

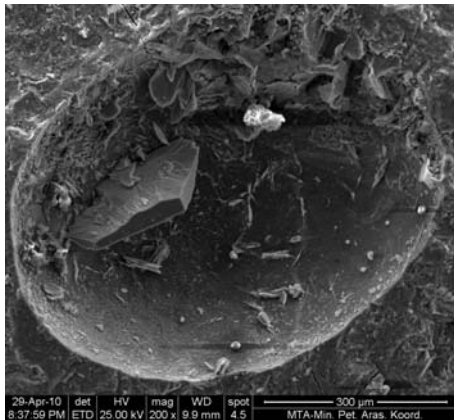


a. PST harç numunesi

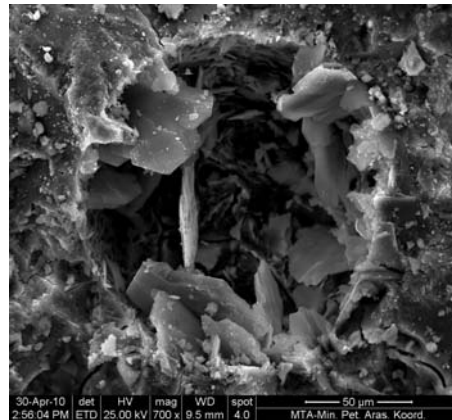


b. SST harç numunesi

Resim 4.14. 28 gün yaşındaki su içinde kürlenmiş harç numunelerinin SEM görüntüleri

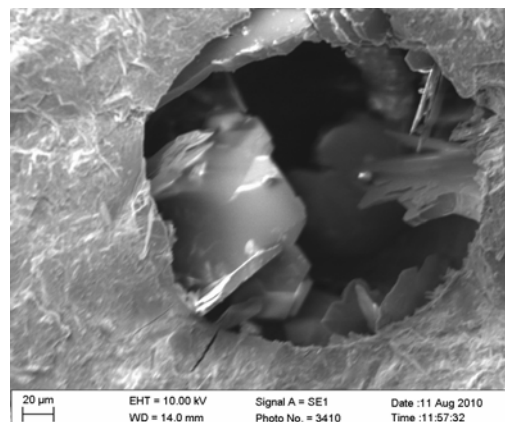
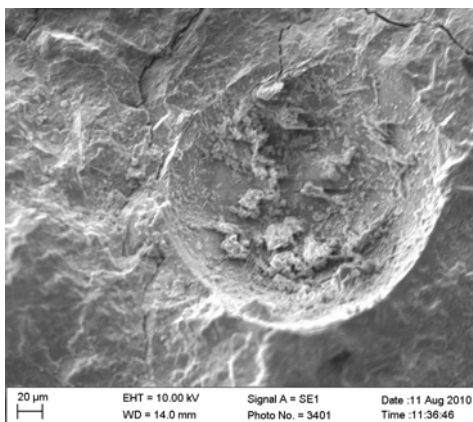


a. PST harç numunesi

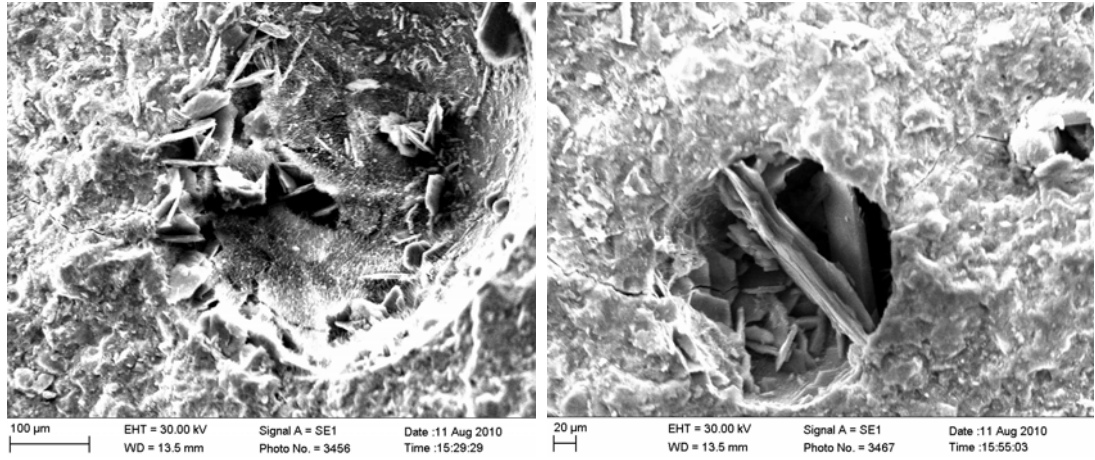


b. SST harç numunesi

Resim 4.15. 70 gün yaşındaki su içinde kürlenmiş harç numunelerinin SEM görüntüleri



Resim 4.16. 180 gün yaşındaki PST harç numunelerinin SEM görüntüleri



Resim 4.17. 180 gün yaşındaki SST harç numunelerin SEM görüntüleri

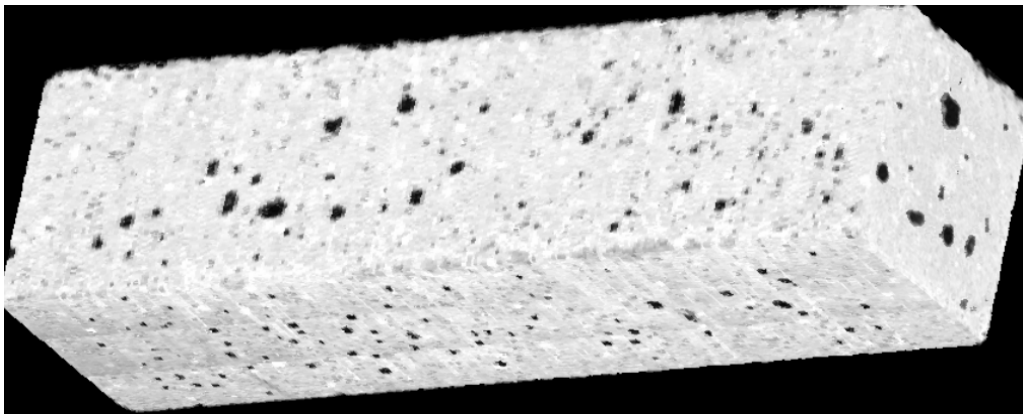
Tarayıcı elektron mikroskobundan elde edilen görüntüler incelendiğinde aşağıdaki yorumlara ulaşılmıştır:

- Resim 4.14'te 28 gün yaşındaki PST harç numunelerinin gözeneklerinde iğne biçiminde kristalleşmiş yoğun etringit oluşumuna rastlanırken, aynı süreçte SST harç numunelerinin gözeneklerinde kalsiyum alümina silikat oluşumlarına da rastlanılmıştır. Bu oluşan kristal yapılar gözenek içi yoğunluğu artırarak BT görüntülerinin HU değerlerini artırmıştır. Bu nedenle ilk 28 günlük süreçte makro boşluk oranları azalma eğilimine girmiştir. 28 günlük süreçte PST ve SST harç numunelerinin makro boşluk oranları incelendiğinde PST1 ve PST 2 numunelerinin 2 – 28 gün yaşları arasında ortalama %1,00 oranında azalma gerçekleşirken, SST1 ve SST 2 numunelerinin 2 – 28 gün yaşları arasında ortalama %0,90 oranında azalma olmuştur. Bu iki oran arasında çok küçük bir fark vardır.
- Resim 4.15'te 70 gün sonunda elde edilen SEM görüntülerinde her iki PST ve SST harç numunelerinin gözeneklerinin bir kısmında yoğun, diğer kısmında az miktarda oluşan portlandit kristalleri gözlenmektedir. Bu süreçte görüntülenen diğer SEM görüntüleri incelendiğinde gözenekler içinde portlandit oluşumları SST numunelerinde PST numunelerine göre daha fazla orandadır. Buna göre PST ve SST harç numunelerinin makro boşluk oranları incelendiğinde PST 1 ve PST 2 numunelerinin 28 – 70 gün yaşları arasında ortalama %0,1 oranında azalma

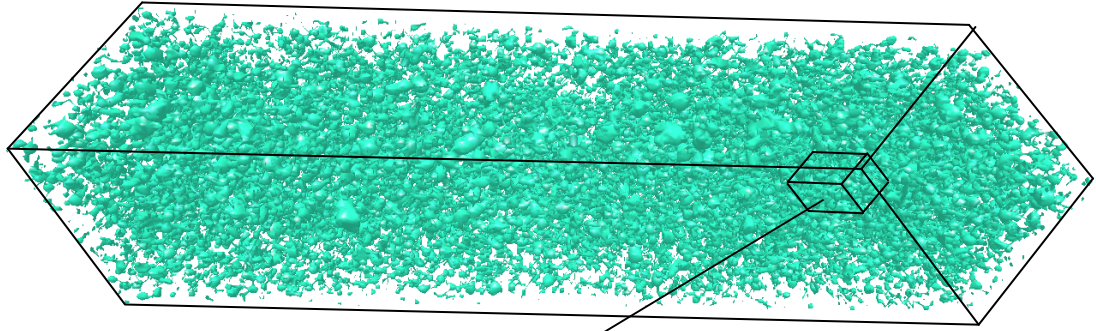
gerçekleşirken, SST 1 ve SST 2 numunelerinin 28 – 70 gün yaşları arasında ortalama %0,4 oranında azalma olmuştur.

- Resim 4.16 ve 4.17’de 180 gün yaşındaki PST ve SST harç numunelerin gözeneklerinden bazı örnekler gösterilmiştir. Bu resimler incelendiğinde PST harç numunelerinin bazı gözeneklerinde az miktarda kristal oluşumuna rastlanırken, bazı gözeneklerinde yoğun portlandit kristalleri ve kristal aralarında etringit oluşumları gözlemlenmiştir. SST harç numunelerinin gözeneklerinde ise SEM görüntülerinde örneklendiği gibi bir kısım gözenekte yoğun portlandit kristali ile etringit oluşumları gözlemlenirken, özellikle çapı küçük olan ve derin gözeneklerde yoğun portlandit oluşumlarına rastlanılmıştır. Bu süreçte BT sonuçları incelendiğinde PST ve SST için makro boşluk oranının artış eğilimine girdiği söylenebilir.

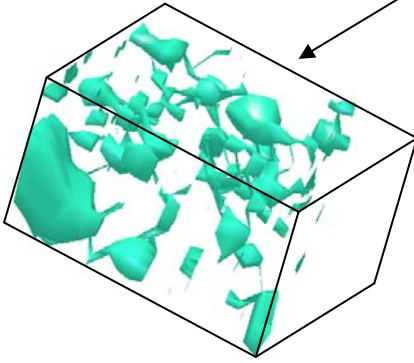
Gözeneklerdeki değişim örnek BT görüntüleri ile Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12’de açıklanmaya çalışılmıştır. Şekil 4.10-4.12’de yalnızca 2 gün yaşındaki PST 1 harç numunesi üzerinde 3D Doctor paket programı yardımıyla 3D modelleme yapılmıştır. PST 2, SST 1 ve SST 2 harç numunelerinde makro boşlukların dağılımı benzer bir görünümde olduğu için diğerleri modellenmemiştir. Şekil 4.10’da numunenin orijinal görüntüsü, Şekil 4.11’de PST 1 harç numunesi içindeki gözeneklerin dağılımı modellenmiştir. Şekil 4.12’de 2 gün yaşında PST 1 harç numunesinin 12,5 x 10 x 7 mm boyutlarındaki asıl numuneden alınarak büyütülmüş kısmın gözenek dağılımı modellenmiştir.



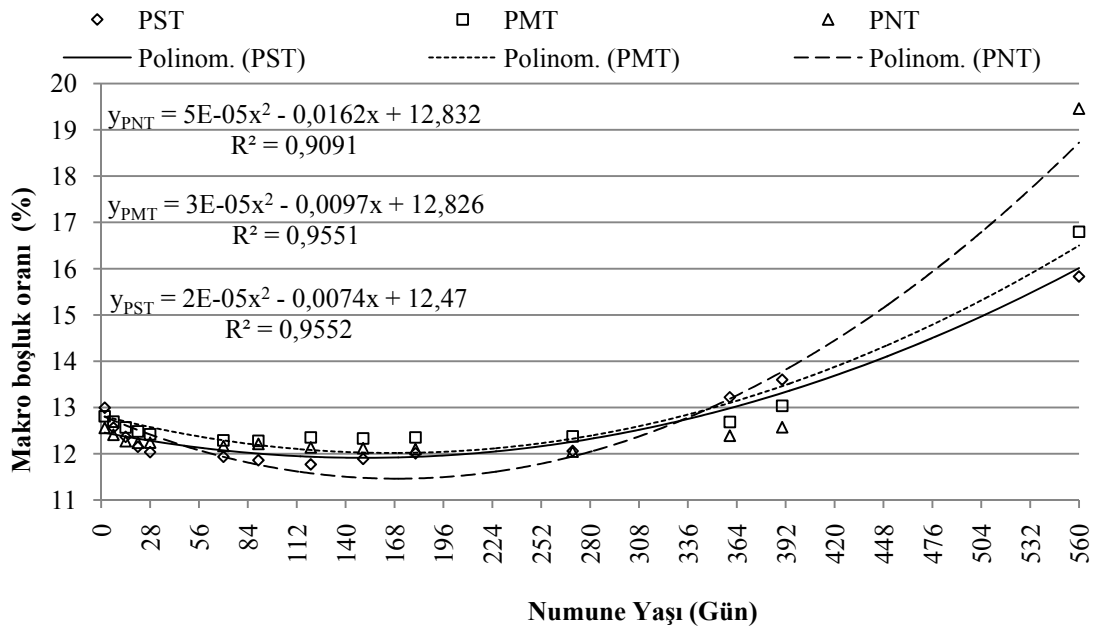
Şekil 4.10. 2 gün yaşında PST1 harç numunesinin 3D topografyası



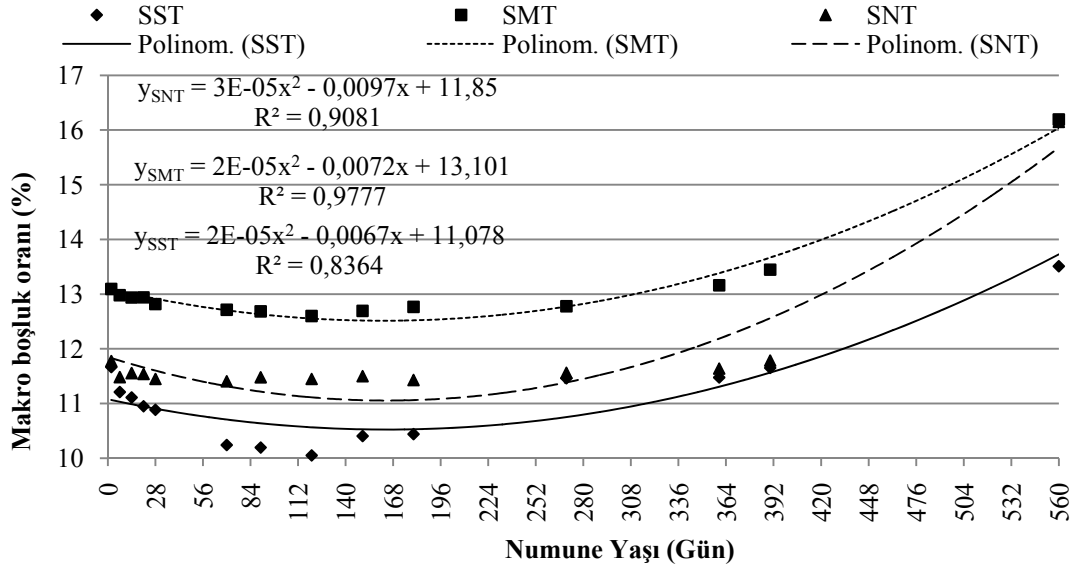
Şekil 4.11. 2 gün yaşında PST1 harç numunesi gözeneklerin 3D topografyası



Şekil 4.12. 2 gün yaşında PST1 harç numunesinin büyütülmüş kısmın 3D bölümü



Şekil 4.13. CEM I harç numunelerinin ortalama gözenek oranlarının gelişim regresyon grafiği



Şekil 4.14. SRC harç numunelerinin ortalama gözenek oranlarının gelişim regresyon grafiği

Suda, Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilmiş 2 – 560 gün yaşındaki CEM I ve SRC harç numunelerinin makro boşluk oranlarının aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Sonuçlar makro boşluk oranındaki gelişim olarak Microsoft Office Excel programı yardımıyla Şekil 4.13 ve 4.14’de regresyon eğrisi, denklemi ve R^2 değerleri halinde gösterilmiştir.

Şekil 4.13’de verilen CEM I harç numunelerinin regresyon eğrileri ve R^2 değerlerine göre:

- PST harç numunesinin makro boşluk gelişim eğrisi 120 gün yaşına kadar azalma eğiliminde, sonrasında artış eğilimindedir. Bu durum polinomik ikinci dereceden bir denklemle tanımlanmıştır. Elde edilen R^2 değeri 0,95 seviyesindedir. Bu oran elde edilen verilerin denklemle yaklaşık olarak %95 oranda uyumluluğunu göstermektedir.
- PMT harç numunesinin makro boşluk gelişim eğrisi 70 gün yaşına kadar azalma eğiliminde, sonra 70 – 180 gün yaşları arasında yatay bir gelişimle, sonrasında artış eğilimindedir. Bu durum polinomik ikinci dereceden bir denklemle tanımlanmıştır. Elde edilen R^2 değeri 0,95 seviyesindedir. Bu oran PST

numunelerinde olduğu gibi elde edilen verilerin denklemlerle yaklaşık olarak %95 oranda uyumluluğunu göstermektedir.

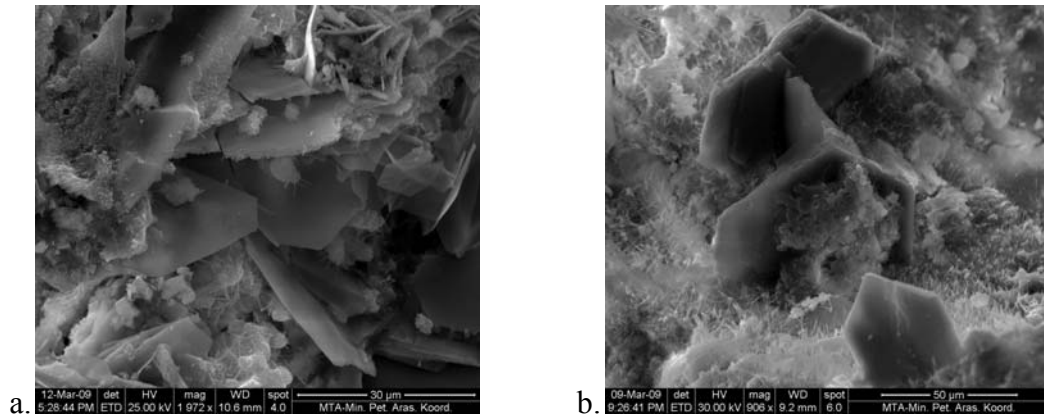
- PNT harç numunesinin makro boşluk gelişim eğrisi 270 gün yaşına kadar azalma eğiliminde, sonrasında artış eğilimindedir. Bu durum polinomik ikinci dereceden bir denklemlerle tanımlanmıştır. Elde edilen R^2 değeri 0,90 seviyesindedir. Bu oran elde edilen verilerin denklemlerle yaklaşık olarak %90 oranda uyumluluğunu göstermektedir.

Şekil 4.14'te SRC harç numunelerinin regresyon eğrileri ve R^2 değerlerine göre:

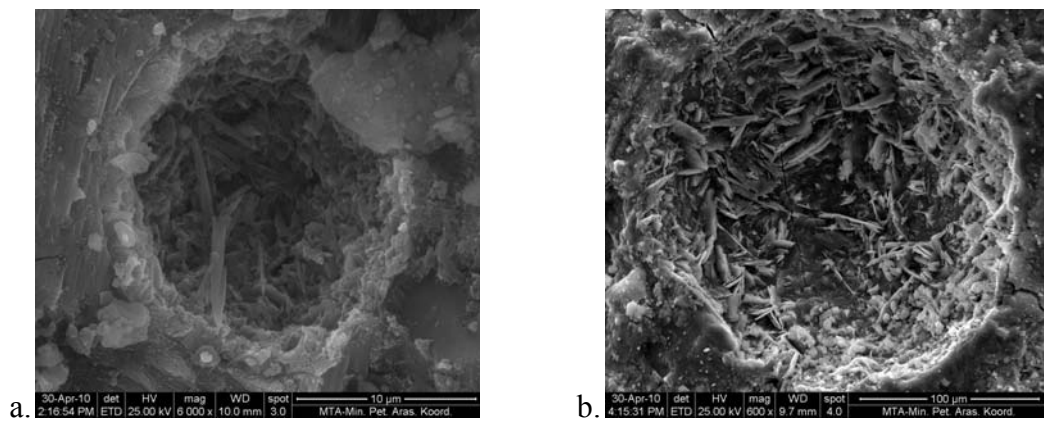
- SST harç numunesinin makro boşluk gelişim eğrisi 120 gün yaşına kadar azalma eğiliminde, sonrasında artış eğilimindedir. Bu durum polinomik ikinci dereceden bir denklemlerle tanımlanmıştır. Elde edilen R^2 değeri 0,84 seviyesindedir. Bu oran elde edilen verilerin denklemlerle yaklaşık olarak %84 oranda uyumluluğunu göstermektedir.
- SMT harç numunesinin makro boşluk gelişim eğrisi 120 gün yaşına kadar azalma eğiliminde, sonrasında artış eğilimindedir. Bu durum polinomik ikinci dereceden bir denklemlerle tanımlanmıştır. Elde edilen R^2 değeri 0,98 seviyesindedir. Bu oran PST numunelerinde olduğu gibi elde edilen verilerin denklemlerle yaklaşık olarak %98 oranda uyumluluğunu göstermektedir.
- SNT harç numunesinin makro boşluk gelişim eğrisi 270 gün yaşına kadar azalma eğiliminde, sonrasında artış eğilimindedir. Bu durum polinomik ikinci dereceden bir denklemlerle tanımlanmıştır. Elde edilen R^2 değeri 0,91 seviyesindedir. Bu oran elde edilen verilerin denklemlerle yaklaşık olarak %91 oranda uyumluluğunu göstermektedir.

Na_2SO_4 kürüne maruz CEM I ve SRC harç numunelerinin boşluk oranı gelişimleri 390 gün yaşına kadar benzer davranış göstermiştir. Ancak 390 – 560 gün yaşları arasında PNT harç numunelerinin makro boşluk oranları yaklaşık olarak %7 artış eğilimi gösterirken, SNT harç numunelerinin makro boşluk oranları yaklaşık olarak %4 artış eğilimi göstermiştir. CEM I ve SRC tip harç numunelerinin makro boşluk oranlarındaki gelişimlerin ilk yaşlarda birbirine benzemesi normal bir davranış olarak

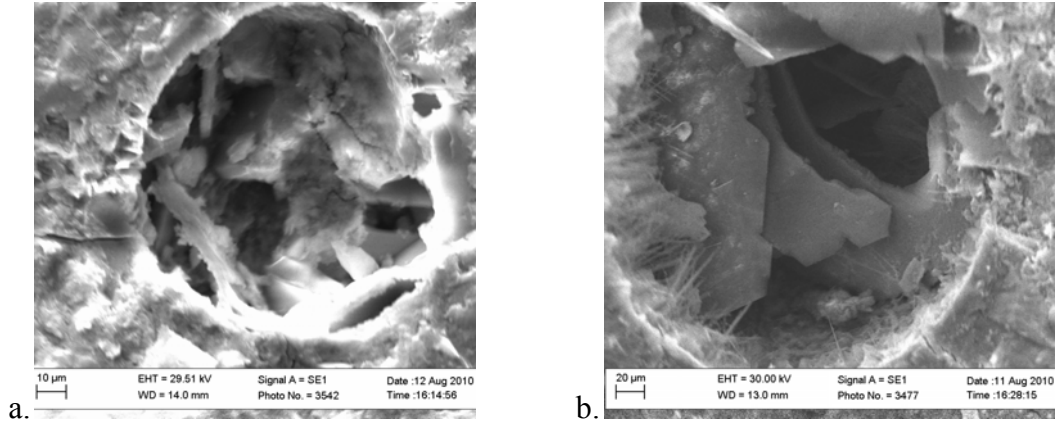
görülmektedir. Numunelerin erken yaşlarda boşluk oranlarındaki azalma; gözenekler içinde gerçekleşen reaksiyon ürünlerinin gözenek yoğunluğunu artırması ve sonuçta BT değerlerinin artışıyla birlikte gözeneklerin reaksiyon ürünleriyle dolmasının bir göstergesidir. Reaksiyon ürünleri Resim 4.18 ve 4.19'da gösterildiği gibi erken yaşlarda portlandit sonraki yaşlarda etringit oluşumları yönündedir. Resim 4.18'de 28 gün, Resim 4.19'da 70 gün ve Resim 4.20'de 180 gün yaşındaki PNT ve SNT harç numunelerinin alınmış örneklerin hava boşluklarındaki reaksiyon ürünleri gösterilmiştir.



Resim 4.18. 28 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri a. PNT b. SNT



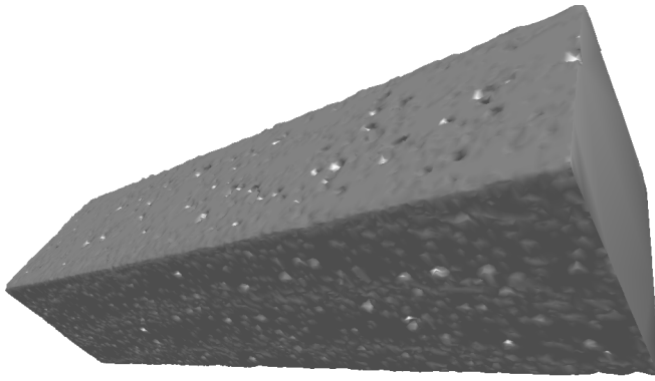
Resim 4.19. 70 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri a. PNT b. SNT



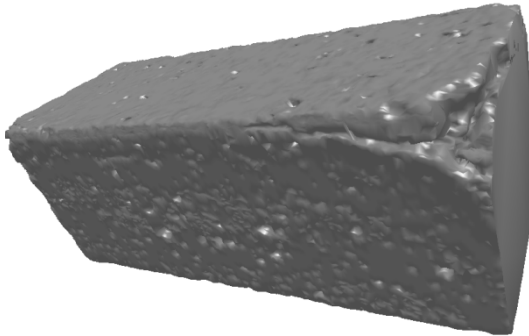
Resim 4.20. 180 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri a. PNT b. SNT

- Resim 4.18’de gösterilen SEM görüntülerinde görülen kısa çubuksu yapılar etringit kristalleri, levha halindeki yapılar ise portlandit kristalleridir. PNT harç numunelerinin gözeneklerinde SNT harç numunelerine göre daha fazla oranda portlandit olduğu, ancak etringit kristallerinin SNT gözenek çeperlerinde daha fazla olduğu görülmüştür. Etringit molekülünün atomik yoğunluğu portlandit molekülüne göre daha büyüktür. Bu sebeple gözenek çeperlerinde oluşan etringit kristalleri, portlandite göre gözenek yoğunluğunu daha fazla artırır. Böylece BT görüntülerinde hava boşluğunda okunan HU değerleri yükselir. HU değerleri yükseldiğinde boşluk olarak tanımlanan bir kısım alan katı olarak görüntülenir, sonuç olarak hava boşluklarının oranı diğerine göre daha fazla azalır.
- Resim 4.19’de 70 gün yaşındaki numunenin hava boşluklarından birer örnek gösterilmiştir. Burada diğer SEM görüntüleri de incelendiğinde gözeneklerde oluşan portlandit ve etringit kristal yapılarının arttığı gözlemlenmiştir. Böylece BT analizlerinde elde edilen verilere göre makro boşluk oranlarının azalma eğiliminin sebebi ispatlanmıştır.
- Resim 4.20’de 180 gün yaşındaki numunenin SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre resimlerde de görüldüğü gibi gözeneklerin çoğunluğu portlandit ve etringit kristalleri ile dolmuştur. Bu sebeple gözeneklerdeki azalma eğilimi devam etmektedir.

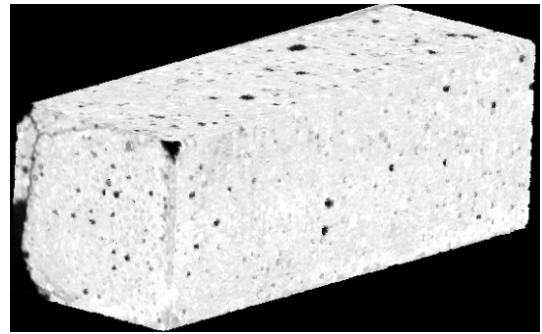
Diğer SEM görüntüleri ve şekillerde gösterilenlere göre PNT ve SNT harç numunelerinde başlangıçta portlandit dolu gözeneklerde ileri zamanlarda portlandit ve etringit oluşumu gözlenmiştir. Bu oluşumlar sebebiyle makro boşluk oranları azalmıştır. Daha sonraki yaşlarda 390 - 560 gün yaşları arasında CEM I ve SRC harç numunelerinin boşluk oranlarındaki gelişim artış eğrisi oluşturmuştur. CEM I harç numunelerinin boşluk oranındaki artış $\sim\%7$ mertebesindeyken, SRC harç numunelerinin boşluk oranındaki artış $\sim\%4$ mertebesinde gerçekleşmiştir. Bunun sebebi PNT ve SNT harç numunelerinin dış kabuğunda oluşan çatlamlardır. PNT ve SNT harç numunelerinin içlerinde özellikle dış kabuğa yakın mesafede oluşan çatlamlar 3D Doctor programı yardımıyla BT kesit görüntüleri modellenerek Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



2 gün yaşında PNT 1 harç numunesi 3D topografyası



360 gün yaşında PNT 1 harç numunesi



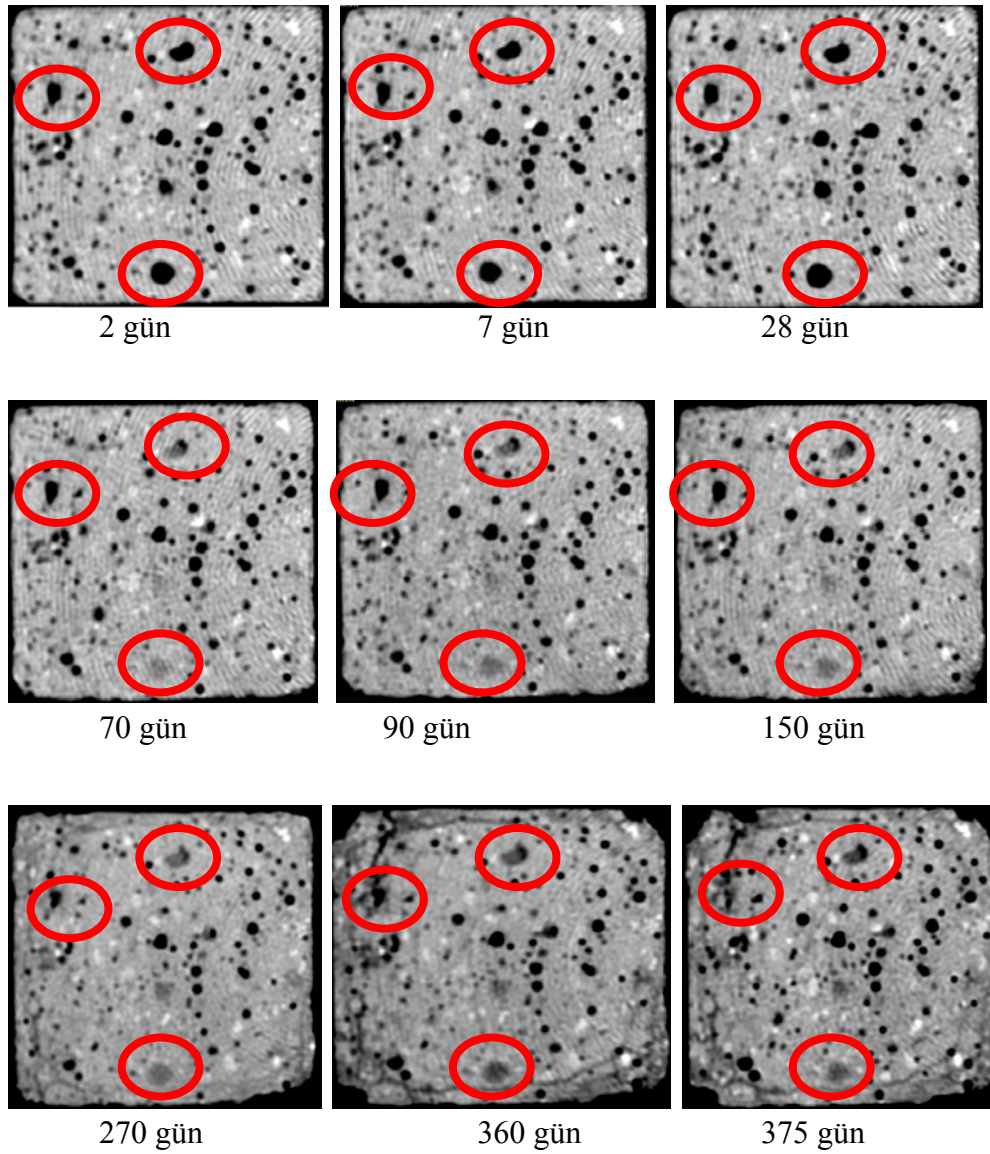
560 gün yaşında PNT 1 harç numunesi

Şekil 4.15. PNT 1 numunesinin farklı süreçlerdeki 3 boyutlu görüntüleri

CEM I ve SRC harç numunelerinin her ikisindeki makro boşluk oranlarındaki artış basınç dayanımı deney sonuçlarındaki 180 günden sonraki düşüşle eşdeğer

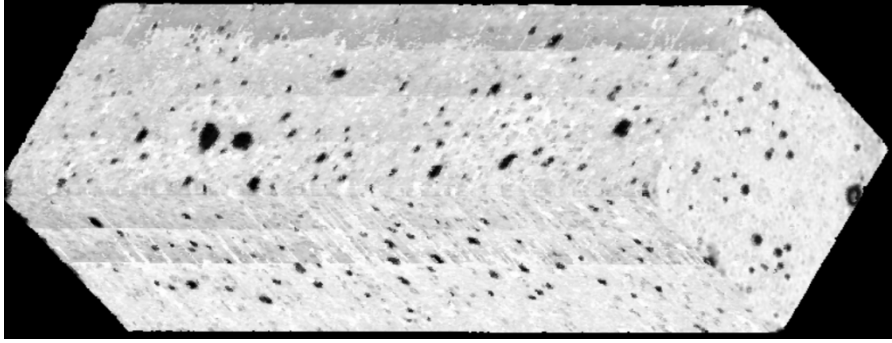
niteliktedir. BT verilerinden elde edilen makro gözenek gelişimleri ile sülfata maruz kalan numunelerde sülfat etkisiyle oluşan çatlamlar dikkate alındığında, harç numunelerinde oluşmaya başlayan kırılma ve çatlakların gözenekliliği artırdığı düşünülmektedir. Bununla beraber her iki tip çimentoda gözenek gelişiminin birbirine benzediği gözlenmiştir. Bu davranış ile her iki çimento tipinin sülfat etkisine gösterdiği fiziksel davranış için benzer olduğu yaklaşımda bulunulabilir. Bunun sebebi sülfat etkisiyle adezyon kuvvetlerinde azalma olurken, betonun yoğunluğu azalır, kristal oluşumu sebebiyle boşluklar dolar. Sonrasında kristal gelişiminin gözenek duvarlarına yaptığı basınçla birlikte genleşme artar. Böylece sülfat etkisine maruz harçlarda belli bir süre gözenek hacminde azalma olduğu, sonrasında artışın meydana geldiği literatürde de açıklanmıştır [10, 24, 66]. Burada kullanılan SRC 560 günlük süreçte CEM I'e göre daha az fiziksel hasara uğramıştır. Bunun sebebi C_3A miktarının CEM I'e göre daha az olmasındandır. Ancak dikkati çeken asıl durum SRC'nin C_3A miktarı daha az olmasına rağmen makro boşluk oranında azda olsa artış eğiliminin başlamasıdır. Bu durum SRC çimentolarının sülfata dayanımının CEM I çimentolarına göre sadece belirli bir süre daha fazla olduğunun göstergesidir. Resim 4.21'de gösterilen kesit görüntülerde Na_2SO_4 etkisine maruz CEM I harç numunesinin oluşan hasarın numune içindeki gelişimi görülmektedir.

Resimde yuvarlakla belirtilmiş alanlara dikkat edildiğinde 70 gün yaşından sonra bu alanlardaki boşlukların kapandığı görülmektedir. Ayrıca Resim 4.21'de açıkça görülmektedir ki harç numunelerdeki kırılmalar 150 günlük kür süresinden sonra numunenin uç noktasında başlamaktadır. 270 gün yaşındaki numuneden taranan görüntülerde yapılan analizlere göre çatlama şeridi kenardan 4-5 mm uzaklıkta bir yerde başlamaktadır. Numuneler üzerindeki çatlamlar BT görüntülerinin ilk 10 ve son 30 kesitinde (numunenin ilk 6 mm ve son 20 mm) çok belirgin görülmektedir.

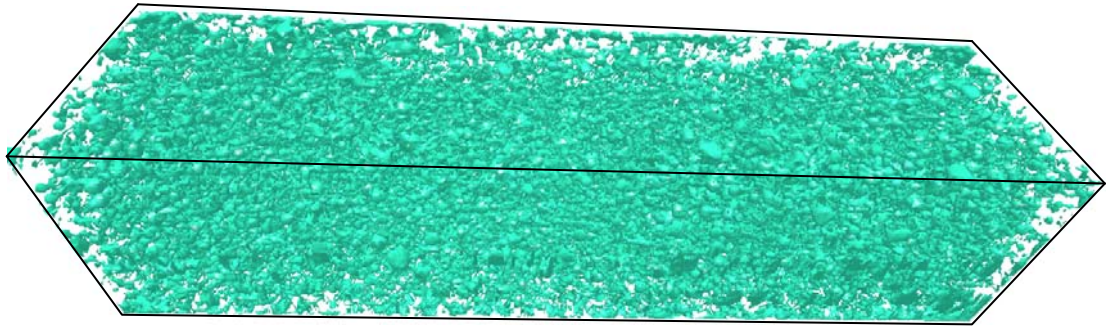


Resim 4.21. PNT 2 referanslı numunenin çeşitli süreçlerde aynı bölgeden alınmış kesit görüntüleri (10 nolu kesitler)

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de SNT 3 harç numunesinin 560 gün yaşındaki 3D modellemesi gösterilmiştir. Bu modellemede görüldüğü gibi numunenin üst kenarında yoğunluğun azaldığı görülmektedir. Bu davranış numunenin kenar kısmındaki çatlama mekanizmasının başladığının bir göstergesidir. Numunenin yoğunluğu az olan bölgelerinde renk beyazdan griye doğru geçmektedir. Bu alanlar BT görüntülerinde boşluk yada çatlak olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.16. 560 gün yaşındaki SNT 3 harç numunesinin 3 boyutlu modellemesi



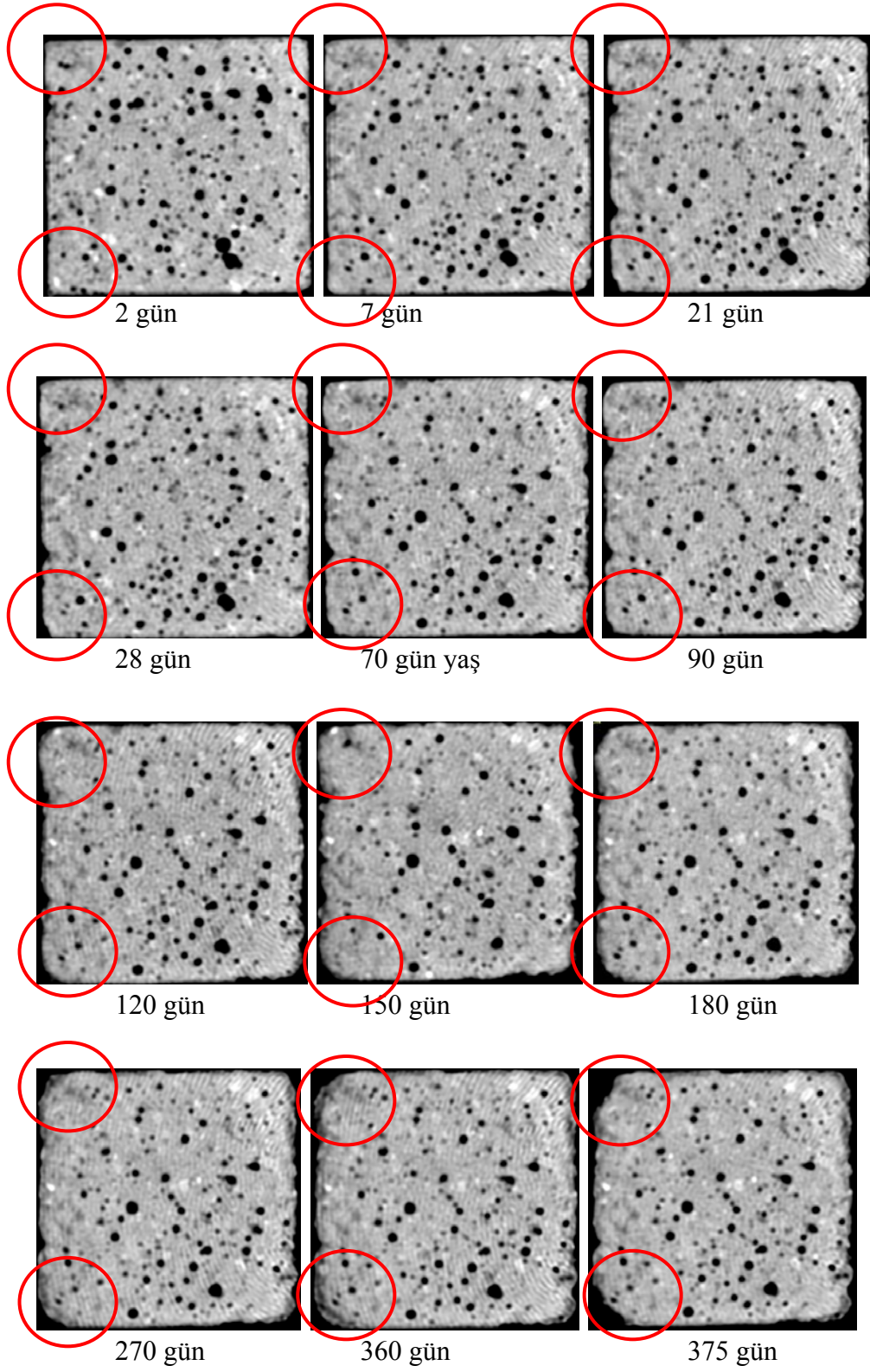
Şekil 4.17. 560 gün yaşındaki SNT 3 harç numunesinin makro boşluklarının 3 boyutlu modellemesi

MgSO₄ etkisine maruz çimento harçlarının gözenek oranlarındaki gelişimler Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 ile gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi her iki tip çimentoda makro gözeneklerin gelişimi sodyum sülfat etkisindeki numunelere benzer özellikte bir davranış sergilemektedir. Ancak MgSO₄'a maruz numunelerdeki belirgin ayrıntı yine Na₂SO₄'a maruz numunelerde olduğu gibi CEM I harç numunesindeki boşluk oranında ilk 70 günde %0,5 oranında azalma kaydedilirken, SRC çimentolu harçlarda ise azalma eğrisi 120 güne kadar sürmekte ve toplam %0,8 oranında azalma kaydedilmesidir. CEM I harç numunesinde 70 - 180 gün arasında sabit kalan makro boşluk oranı sonrasında artış eğrisi göstermekte olup, 390 gün yaşından sonra CEM I harç numunesinde ortalama %4 makro boşluk oranında ani artış gözlenmiştir. SRC harç numunesinde ise 120 – 390 gün yaşları arasında makro boşluk oranlarında yavaş bir artış gözlemlenirken, 390 – 560 gün yaşları arasında ortalama %3 oranında artış gözlenmiştir. Böylece MgSO₄ etkisi altında 560 gün sonunda CEM I harçlarında SRC harçlarına göre makro boşluk oranında daha fazla

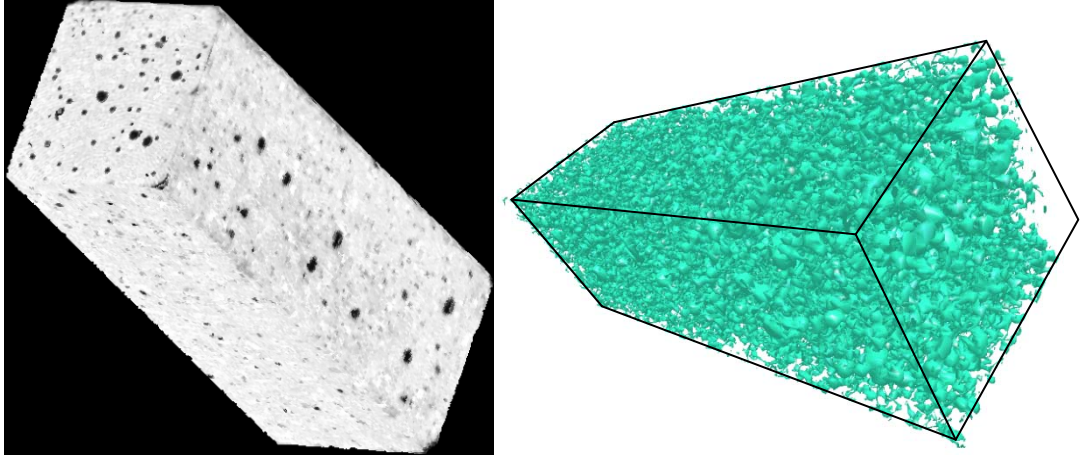
artış olmuştur. Bu davranışın sebepleri Na_2SO_4 etkisine maruz çimento harçları ile aynıdır. Yani sülfat etkisine maruz çimentolarda oluşan reaksiyonlar sonucunda kristal oluşumları gelişmekte ve boşlukların çeperlerine kadar büyümektedirler. Bu büyümenin sonunda boşluk oranları azalmakta, kapiler boşluklar kapanmakta ve çimento harcının yoğunluğu artmaktadır. Kristal gelişimi sırasında MgSO_4 etkisi ile C-S-H moleküllerinin yıkılmasıyla çimentonun adezyon kuvvetinde azalma görülür. Sonrasında ilk başta köşe çatlamaları ve kütle kaybıyla başlayan deformasyon süreci boşluk çeperlerine dayanan kristallerin daha gelişerek büyümesiyle numunelerin kenarlarından başlayan çatlak oluşumlarıyla gelişmektedir [145].

Resim 4.22’de açıklayıcı kesit görüntüler gösterilmiştir. Resimlerde de görüldüğü gibi numunelerde oluşan köşe kırılmaları 120 ve 150 gün yaşlarında belirginleşmeye başlamıştır. 360 gün yaşındaki harç numunenin köşeleri tamamıyla kırılmış ve kütle kaybı artmıştır. Resim 4.22 dikkatle incelendiğinde BT kesitlerindeki görüntülerle aynı oluşum görülebilmektedir. Ayrıca dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta kırılmaya başlayan ve adezyon kuvvetinin zayıfladığı kısımlar harcın kalıba göre üst kısmıdır. Bu kısımda daha fazla deformasyon olmuştur.

Şekil 4.18’de 560 gün yaşındaki SMT 3 harç numunesinin 3D Doctor programı ile oluşturulmuş 3 boyutlu modellemeleri gösterilmiştir. Soldaki şekil BT’den elde edilen kesit görüntülerin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Sağdaki şekil ise BT kesitleri üzerinde makro boşluklar için belirlenen eşik değeri altında kalan HU değerlerinin 3D Doctor programında tanımlanmasıyla, eşik değeri altında kalan piksellerin programda boşluk olarak tanımlanarak numunede segmentasyon işlemi yapıldıktan sonra elde edilmiş görüntüdür. Elde edilen şekilde gözenek dağılımı gösterilmiştir. Burada makro boşluk oranı %19,9 olarak belirlenmiştir.

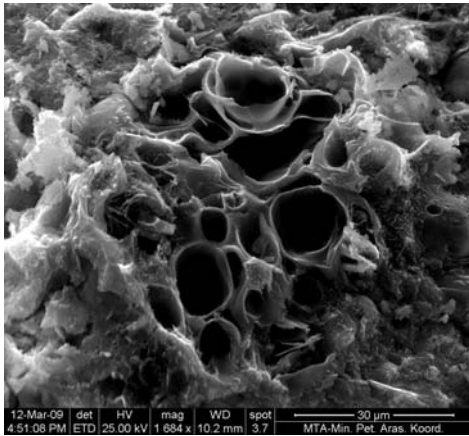


Resim 4.22. PMT harç numunelerinin boşluk oranı gelişimi (10 nolu kesitler)

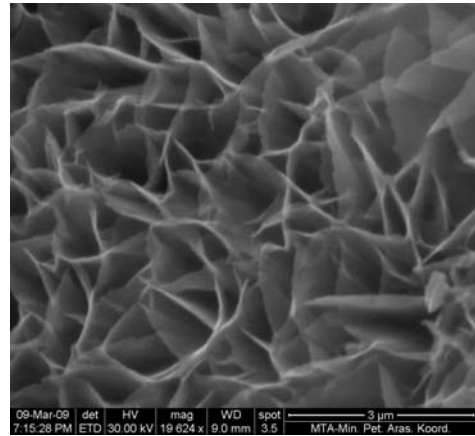


Şekil 4.18. PMT harç numunelerinin 3D modellemeleri

Resim 4.23-4.26’te PMT ve SMT harç numunelerinin çeşitli süreçlerde çekilmiş örnek SEM görüntüleri gösterilmiştir. SEM görüntülemeleri Maden Tetkik ve Arama (MTA) genel müdürlüğüne bağlı tarayıcı elektron mikroskobu laboratuvarında ve Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü’ne bağlı tarayıcı elektron mikroskobu laboratuvarında yapılmıştır. Numuneler üzerinde özellikle makro boşluklar üzerinde yoğunlaşmış ve resimler bu alanlar üzerinden alınmıştır. Görüntüleme işlemi için 25 – 30 kv arasında enerji kullanılmıştır. Elde edilen görüntülerde anlaşılamayan yapılarla ilgili EDS (EDAX) elementer analiz yapılmıştır. Örnek olarak verilen resimlerde görülen kristal yapılar açıklamalarda tanımlanmış olup, EDS analizler ekte verilmiştir.

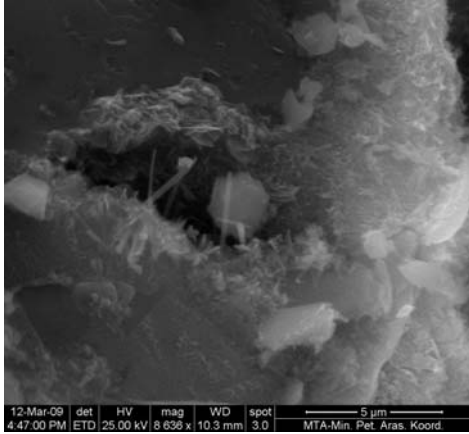


PMT harç numunesi

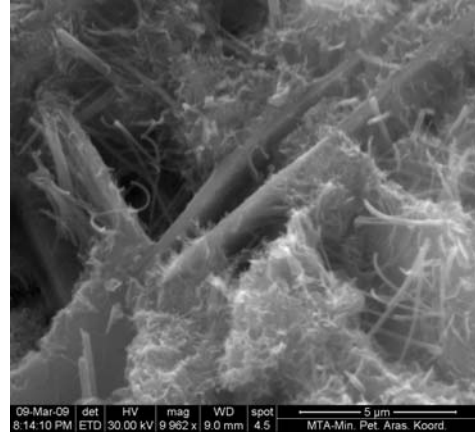


SMT harç numunesi

Resim 4.23. 28 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri

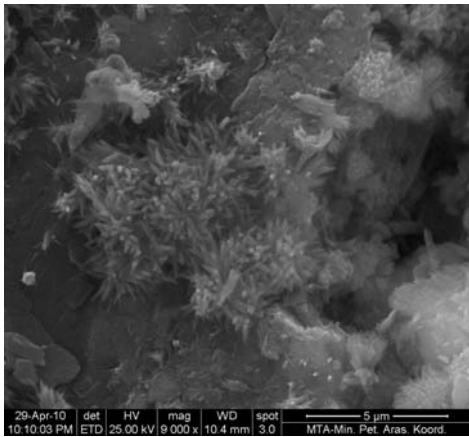


PMT harç numunesi

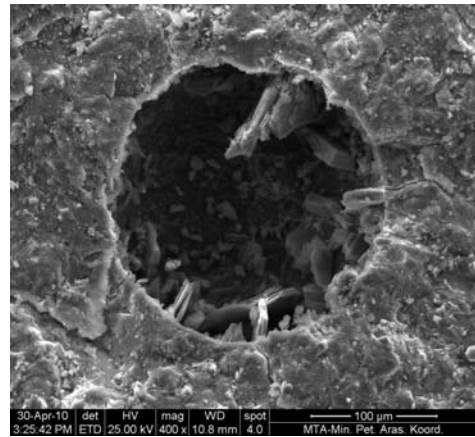


SMT harç numunesi

Resim 4.24. 28 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri

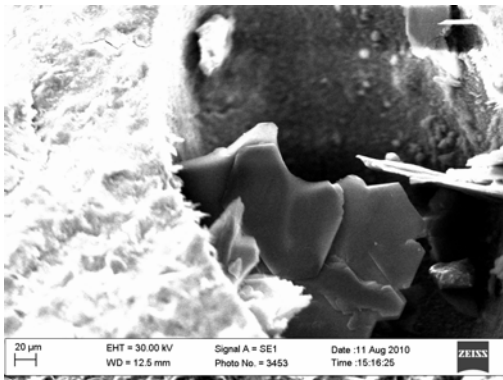


PMT harç numunesi

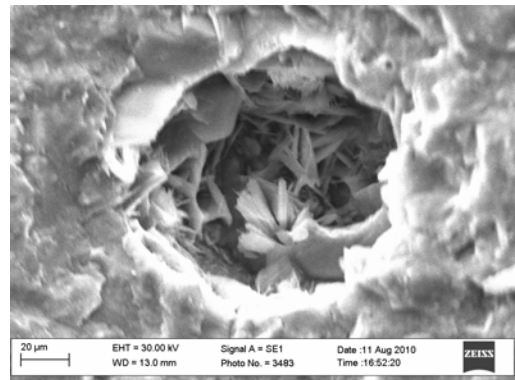


SMT harç numunesi

Resim 4.25. 70 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri



PMT harç numunesi



SMT harç numunesi

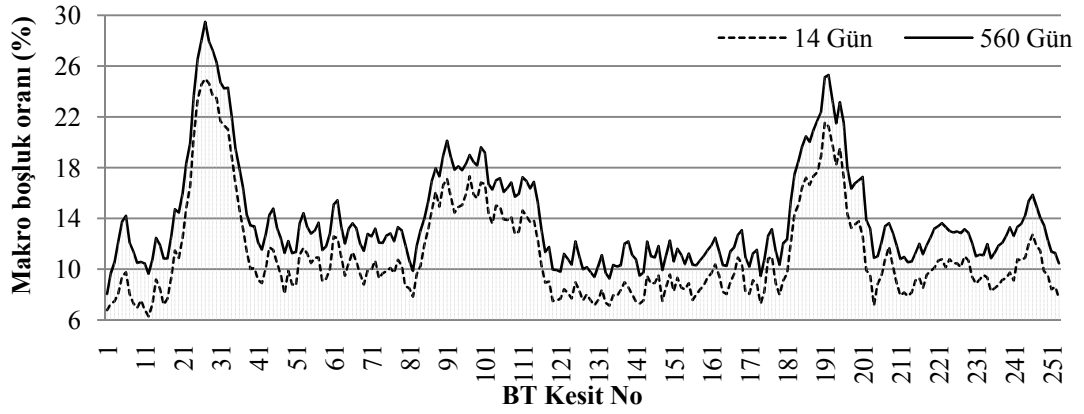
Resim 4.26. 180 gün yaşındaki harç numunelerin SEM görüntüleri

Resim 4.23 ve 4.24'te 28 gün yaşındaki PMT ve SMT harç numunelerinin örnek SEM görüntüleri verilmiştir. Bu resimlerdeki görüntülere göre:

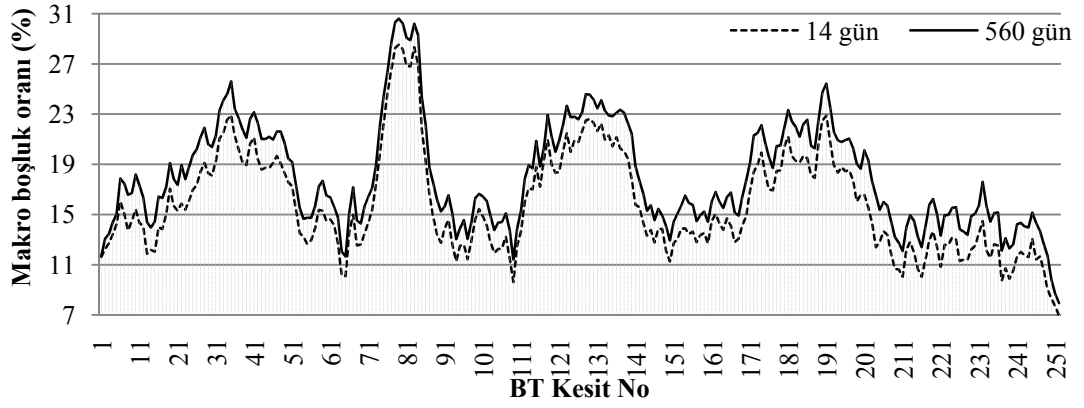
- Resim 4.23'de PMT ve SMT'de görülen yapılar brusit olarak tanımlanmıştır. Diğer resimlerde de yoğun olarak brusit oluşumu gözlenmiştir. Ek olarak 28 gün yaşındaki Resim 4.24'te yine her iki numunede oluşan portlandit ve etringit kristalleri görülmektedir.
- Resim 4.25'te 70 gün yaşındaki PMT ve SMT harç numunelerinin örnek SEM görüntüleri gösterilmiştir. Resimler dikkatle incelendiğinde ve EDS sonuçlarına göre PMT numunesinin gözeneklerinde büyümeye başlayan etringit çubukları sosis gibi görülmektedir. SMT numunesinde ise gözeneklerin bir kısmı yoğun portlandit ile dolu iken diğer bir kısmında etringit kümelerine rastlanılmıştır.
- Resim 4.26'da ise 180 gün yaşındaki PMT ve SMT numunelerinin örnek SEM görüntüleri görülmektedir. SEM görüntülerine göre PMT ve SMT numunelerinin gözeneklerinde yoğun portlandit ve yoğun etringit oluşumları göze çarpmaktadır.

BT'de görüntülenen çimento harçlarının her bir kesit için hesaplanan boşluk oranları Şekil 4.19 – Şekil 4.24'da çizgi grafiği olarak gösterilmiştir. PMT3, PNT3, PST1, SMT3, SNT3 ve SST1 numunelerinin boşluk oranları grafiklerde kullanılmıştır. Kullanılan PMT3, SMT3 ve PNT3 numunelerinde kapsül kullanıldığı için belli kesitler arasında yaklaşık %30 boşluk oranı görülürken, SNT3, PST1 ve SST1 numunelerinde kapsül kullanılmadığı için kesitler arasındaki boşluk oranları birbirine yakın oranlar oluşturmuştur. PST1 ve SST1 numuneleri 390 gün yaşındaki kesilerek basınç dayanımı deneyine tabi tutulduğu için 560 gün yaşındaki kesit sayısı 177'ye düşmüştür. Kapsüllü harç numunelerin kesitlerdeki boşluk oranları incelendiğinde 3 ayrı bölgede boşluk oranlarının arttığı gözlemlenmiştir. Numunenin kenarlarına ve ortalarına harç taze halde iken sıkıştırma sırasında yerleştirilen kapsüller kesit boşluk oranı grafiğinde açık şekilde görülmektedir.

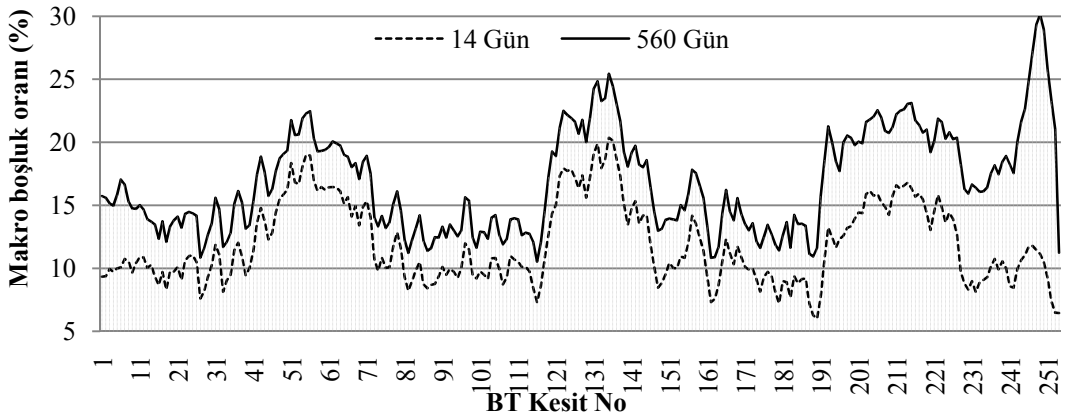
Şekillerde görüldüğü gibi PMT, SMT, PNT ve SNT numuneleri için 14 gün yaşındaki, PST ve SST numuneleri için 2 gün yaşındaki boşluk oranları ile 560 gün yaşındaki boşluk oranlarının değişimi kesitler bazında da artış eğrisi açıkça görülmektedir.



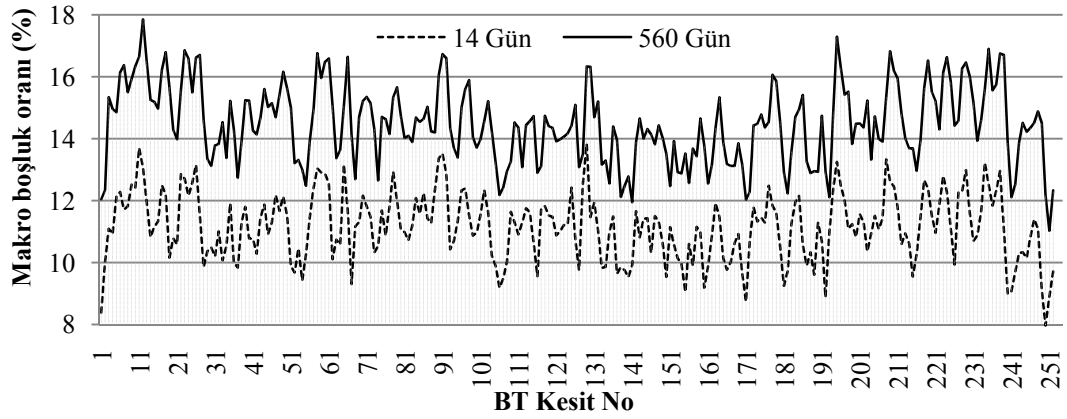
Şekil 4.19 PMT3 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı



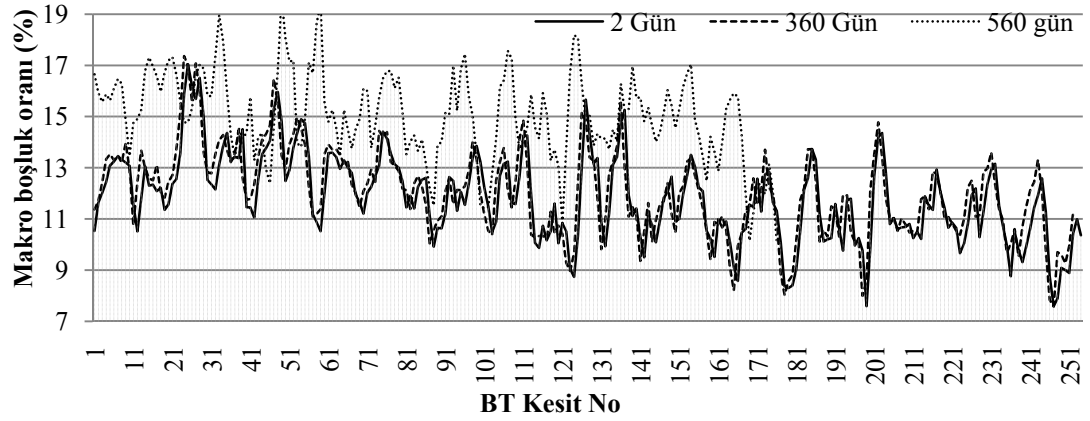
Şekil 4.20 SMT3 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı



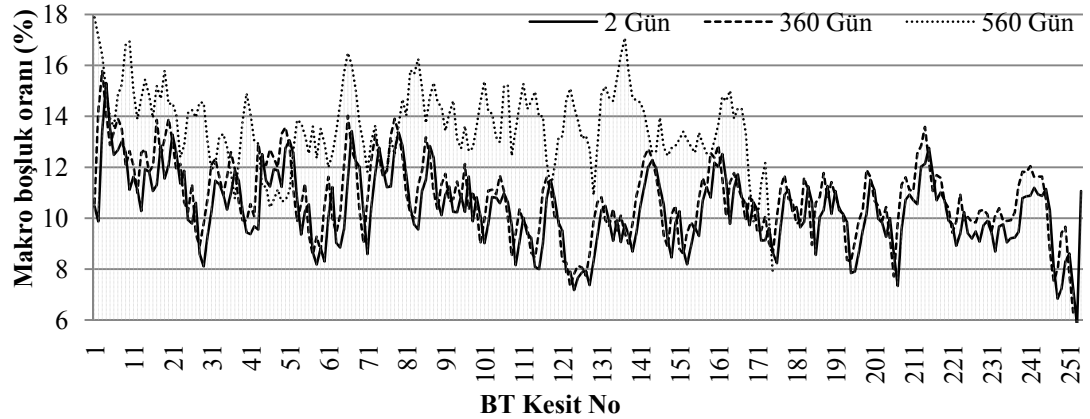
Şekil 4.21 PNT3 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı



Şekil 4.22 SNT3 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı



Şekil 4.23 PST1 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı



Şekil 4.24 SST1 numunesinin her bir kesit için hesaplanmış boşluk oranı dağılımı

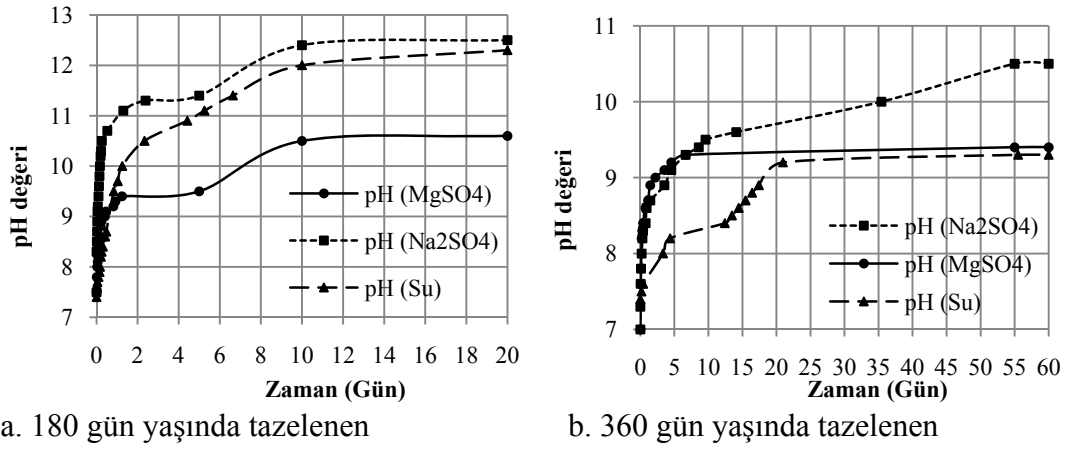
4.6. Çözeltilerin pH değişimleri

Çalışmada kullanılan kür suyu ve Na_2SO_4 ile MgSO_4 çözeltilerinin pH değerleri çeşitli süreçlerde kontrol edilerek sabit bir düzeye geldikten belli bir süre sonra çözeltiler ve su yenilenmiştir. Ancak çözelti hazırlanıp numunelerin çözelti içine daldırıldığı anda çözeltilerin pH değerleri değişmeye başlamaktadır. Değişim belirli bir süreçte devam edip sonra sabit bir çizgide kalmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak çözeltilerden belirli periyotlarda pH ölçümleri yapılmıştır.

Kür suyu ve sülfat çözeltilerinin pH değerlerinin ölçümlerine göre:

- 1 – 7 yaş günleri arasında Na_2SO_4 için pH= 9'den 11'e, MgSO_4 için pH=8'den 9,5'a ve su için pH=7'den 11,5'e çıkmıştır. 7 gün yaşında kür suları tazelenmiştir.
- 7 – 14 gün yaşları arasında Na_2SO_4 için pH= 10, MgSO_4 için pH=9,5 ve su için pH=12 olarak ölçülmüştür. 14 gün yaşında kür suları tazelenmiştir.
- 14 – 28 gün yaşları arasında Na_2SO_4 için pH= 11,3, MgSO_4 için pH=9,4 ve su için pH=9,8 olarak ölçülmüştür. 28 gün yaşında kür suları tazelenmiştir.
- 28 – 70 gün yaşları arasında Na_2SO_4 için pH= 8,9'dan 11,2'ye, MgSO_4 için pH=8,9'dan 9,3'e ve su için pH=9,2'den 11'e çıkmıştır. 74 gün yaşında kür suları tazelenmiştir.
- 70 – 180 gün yaşları arasında Na_2SO_4 için pH= 7,6'dan 10,8'e, MgSO_4 için pH=7,6'dan 9,5'a ve su için pH=7,2'den 10,5'a yükselmiştir. 180 gün yaşında kür suları tazelenmiştir. Zamanlı pH ölçümleri yapılarak Şekil 4.25'te çizgi grafiği olarak gösterilmiştir.

Deneylerde çözeltilerin ve suyun yenilenme sebebi, çözeltilerin pH değerini azaltarak sülfatın etki hızını artırmak, böylece daha kısa sürede hasar sürecini gözlemlemek amacıyla yapılmıştır.



Şekil 4.25. Kür suyu ve sülfat çözeltilerinin pH değerlerinin zamana göre değişimi

- 180 gün yaşında gerçekleştirilen ölçümlere göre pH değerleri 3 farklı sıvı için yaklaşık 2 gün içerisinde nihai pH değerine ulaşmaktadır. Sonrasında çok yavaş ilerleme göstererek sonra belirli bir süre hızlı artışını sürdürmektedir. Sonrasında sabitlenerek aynı eğride aynı pH değerini korumuştur. 180 – 270 gün yaşları arasındaki pH değişiminin sonunda Na_2SO_4 için $\text{pH}=11,4$, MgSO_4 için $\text{pH}=9,5$ ve su için $\text{pH}=8,9$ olarak ölçülmüştür. 330 gün yaşında kür suları tazelenmiştir.
- 330 – 360 gün yaşları arasındaki pH değişiminin sonunda Na_2SO_4 için $\text{pH}=7,3$ 'ten $12,1$ 'e, MgSO_4 için $\text{pH}=8,4$ 'ten $10,6$ 'ya ve su için $\text{pH}=7,3$ 'ten $9,6$ 'ya yükselmiştir. 360 gün yaşında kür suları tazelenmiştir. Zamanlı pH ölçümleri yapılarak 360 gün yaşındaki kür havuzları için Şekil 4.30'da çizgi grafiği olarak gösterilmiştir.
- 360 gün yaşında gerçekleştirilen ölçümlere göre MgSO_4 için yaklaşık 6, Na_2SO_4 için 55, ve su için 20 gün içerisinde nihai pH değerlerine ulaşmaktadır. Sonrasında tüm sıvılar sabitlenerek aynı eğride aynı pH değerini korumuştur.
- 480 gün yaşında ölçülen pH değerleri Na_2SO_4 için $\text{pH}=9,8$, MgSO_4 için $\text{pH}=9,0$ ve su için $\text{pH}=9,0$ 'dur. 560 gün yaşında ölçülen pH değerleri Na_2SO_4 için $\text{pH}=10,5$, MgSO_4 için $\text{pH}=9,1$ ve su için $\text{pH}=9,2$ 'dir. Bu süreçte sıvıların tazelemesi yapılmamıştır.

Kür suları ilk hazırlandığında 7-8 pH arasında olmasına rağmen, harç numuneler su kürüne ve sülfat çözeltilerine daldırıldığı andan itibaren hızlı bir şekilde pH

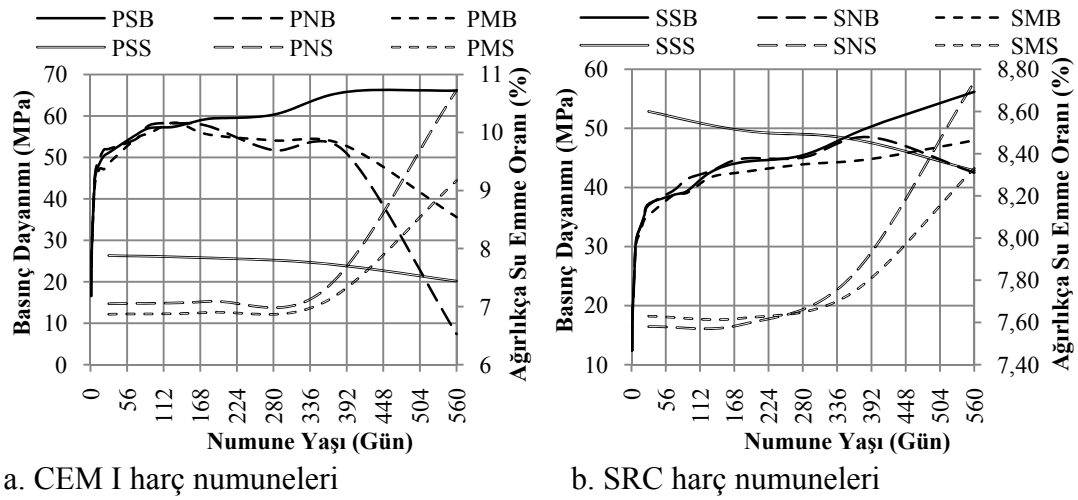
değerlerinde artış olmaktadır. Bunun sebebi normalde pH değeri 13 civarında olan çimento harcının Ca_2OH molekülü suda çözünerek suya OH^- iyonlarını bırakması olarak açıklanmaktadır [11]. Bu değişim literatürle uyum göstermektedir [72]. Kür suyu ile diğer çözeltilerin pH derecelerinin düşmesi yıkanma (leaching) yaklaşımı ile açıklanmaktadır. Bu durum kür suyunun dışarıdan numune içine sızarak harç numunelerin gözeneklerinde bulunan/oluşan çeşitli hidratasyon ürünlerini yıkaması ve numunenin dışına taşıyarak numunenin ve kür suyunun ilk günlerde pH derecesini artırmasıyla açıklanmaktadır. Ancak daha sonrasında tamamen yıkanan hidratasyon ürünlerinin başında gelen portlandit tükendiğinde artık C-S-H molekülü dekalsifikasyona uğrayarak parçalanma aşamasına girer. Böylece pH değerini yüksek derece tutmaya çalışır. Ancak suların sürekli değiştirilmesi ile harcın bağlayıcıları parçalanacağından yumuşama denilen yoğunluk kaybı görülmeye başlanacaktır. Bu durum pH değerinin düşmesine sebep olur.

4.7. Verilerin Çapraz Değerlendirilmesi

Araştırmada gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar ikili kalitatif analiz ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada öncelikle grafik metot kullanılmıştır. Grafiklerde elde edilen eğriler üzerinden yorumlamalar yapılarak benzer gelişim gösteren eğriler için deney yöntemleri ve sonuçları arasında ilişki olduğu belirtilmiştir. Grafikler Microsoft Office Excel programı yardımıyla çizilmiştir. Grafiklerde ikili eksen uygulaması kullanılarak iki deney arasındaki ilişki gözlemlenmiştir. Karşılaştırmada kalitatif yöntemin seçilmesinin sebebi deneyler arasında bir bağıntı olmaması sebebiyledir. Bağımlı değişken olmaması sebebiyle deneylerin karşılaştırmasında istatistik analiz yapılmamıştır.

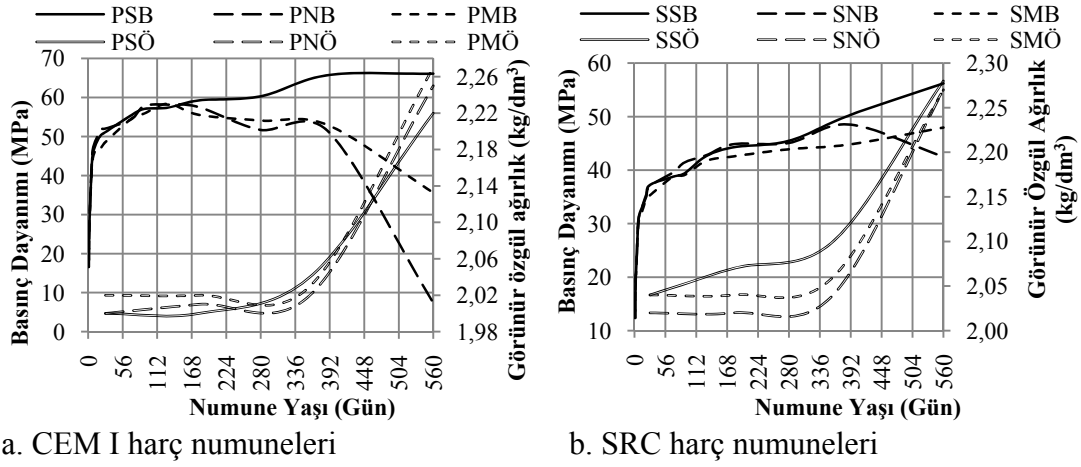
CEM I harç numunelerinin su emme deney sonuçları ile basınç dayanımı deney sonuçları karşılaştırıldığında, su içinde bekletilen referans numunelerin ağırlıkça su emme sonuçları azalırken basınç dayanımı artmaktadır. Sülfata maruz numunelerin ağırlıkça su emme sonuçları zamana bağlı olarak artarken basınç dayanımı belli bir zamana kadar artış göstermekte sonrasında azalmaktadır. Böylece referans numunelerin ağırlıkça su emme sonuçları ile basınç dayanımı arasında ters orantılı

bir ilişki oluşurken, sülfata maruz harçların ağırlıkça su emme sonuçları ile boy değişimi sonuçları arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu görülmüştür. SRC harç numunelerinin ağırlıkça su emme – basınç dayanımı arasındaki ilişki CEM I’de görülen ağırlıkça su emme – basınç dayanımı arasındaki ilişki kadar güçlü olmadığı görülmektedir (Bkz. Şekil 4.26).



Şekil 4.26. Basınç dayanımı deney sonuçları ile ağırlıkça su emme oranı sonuçlarının karşılaştırma grafikleri

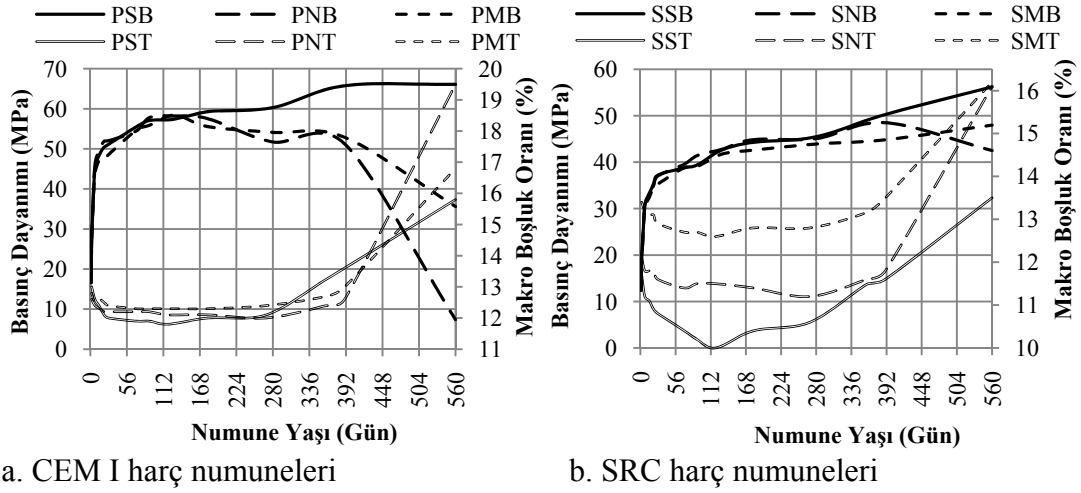
Şekil 4.27’de tüm numune gruplarında elde edilen özgül ağırlık verileri ile basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Şekil incelendiğinde referans numuneleri için özgül ağırlık değerleri arttıkça basınç dayanımının da arttığı, böylece doğru orantılı bir ilişki olduğu söylenebilir. Ancak sülfata maruz harç numuneler için 560 günlük süreçte doğru orantılı bir ilişki olduğu söylenemez. Ancak 280 gün yaşından sonra görünür özgül ağırlık arttıkça basınç dayanımında ani azalma görülmektedir. Bu durum gözeneklerin bir kısmında biriken kristal yapılardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sülfat kristallerinin özgül ağırlık verileri Çizelge 3.3’te incelendiğinde 2,6 – 2,7 arasında olduğu görülmektedir. Bu yoğunluk gözeneklerde biriktiğinde görünür özgül ağırlığı artırabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.27. Basınç dayanımı deney sonuçları ile görünür özgül ağırlık sonuçlarının karşılaştırma grafikleri

Şekil 4.28’de gösterildiği gibi CEM I harç numunelerinin 2 – 28 gün yaşları arasında makro boşluk oranları hızla azalırken basınç dayanımları ters orantıyla hızla artmaktadır. Sonrasında PST ve PSB numuneleri haricinde sülfata maruz harç numuneler için 28 – 360 gün yaşları arasında yaklaşık yatay doğrultuda gelişen basınç dayanımları ve makro boşluk oranları, 360 – 560 gün yaşları arasında makro boşluk oranlarında ani artış gözlemlenirken basınç dayanımları ters orantıyla ani azalma eğilimindedir. Buna göre sülfata maruz CEM I harç numuneleri için makro boşluk oranı gelişimleri ile basınç dayanımları arasında ters orantı vardır denilebilir.

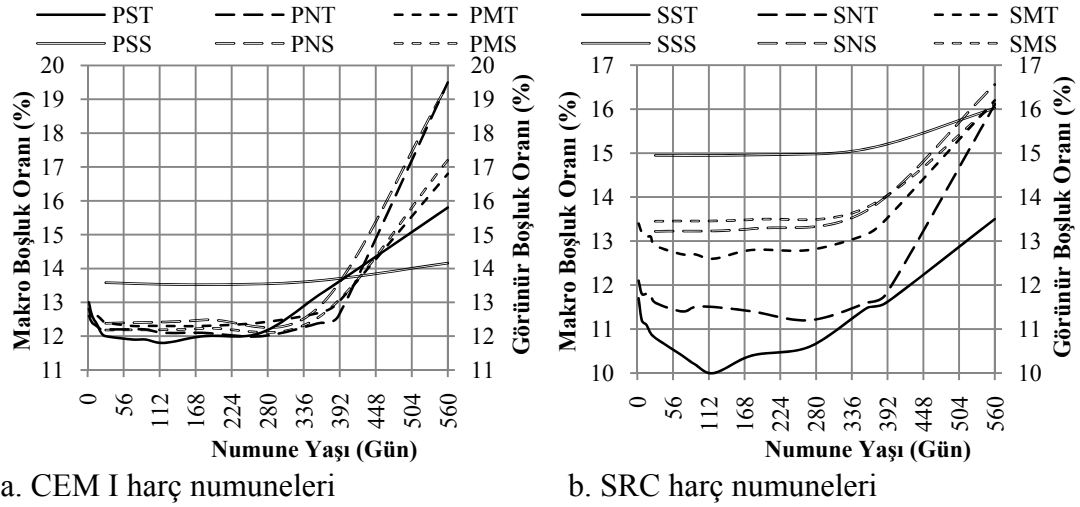
SRC harç numunelerinde ise 2 – 120 gün yaşları arasındaki makro boşluk oranlarındaki azalma davranışı basınç dayanımında aynı süreçlerde artış davranışı ile görülmektedir. Sülfata maruz harç numunelerde CEM I harç numunelerinde olduğu gibi her iki deney sonuçlarında da yataya yakın bir gelişim davranışı gözlemlenirken 360 gün yaşından sonraki süreçte makro boşluk oranları hızla artarken SNB harç numuneleri haricinde basınç dayanımlarında aynı oranda azalma gözlenmemiştir. Na_2SO_4 çözeltisine maruz numuneler için makro boşluk oranları ile basınç dayanımları arasında ters orantılı bir ilişki vardır denilebilir. Diğer harç numuneleri için aynı yorumu 560 günlük süreçte elde edilen sonuçlara göre yapmak mümkün değildir.



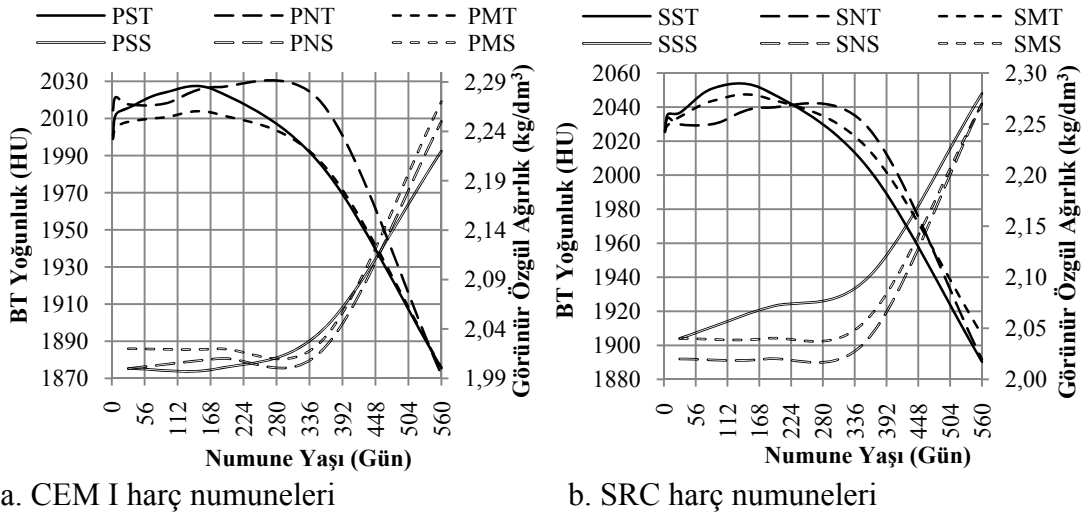
Şekil 4.28. Basınç dayanımı deney sonuçları ile makro boşluk oranı sonuçlarının karşılaştırma grafikleri

Şekil 4.29’da görünür boşluk oranı ile makro boşluk oranı sonuçlarının karşılaştırma grafiği verilmiştir. Şekle göre sülfata maruz CEM I harç numunelerinin görünür boşluk oranı gelişimi ile makro boşluk oranı gelişimi birbirine benzer eğriler oluşturmaktadır. Ayrıca 28 ve 560 gün yaşlarındaki boşluk oranları her iki deneyde birbirine yakın değerlerde çıkmıştır. Bu deney numuneleri için makro boşluk oranları ile görünür boşluk oranları arasında ilişki vardır denebilir. Su içinde bekleyen kontrol numunelerinin görünür boşluk oranı ile makro boşluk oranları gelişimleri için çok net bir yaklaşım geliştirilememiştir.

SRC harç numuneleri için Şekil 4.29 incelendiğinde sülfata maruz harç numuneler için görünür boşluk oranları ile makro boşluk oranı gelişimleri arasında bir ilişki olduğu görülmektedir. Ancak bu ilişki yalnızca gelişim eğrilerinin benzerliğinden kaynaklanmaktadır. Su içinde bekletilen harç numuneler için 360 gün yaşına kadar herhangi bir ilişki görülmemiştir. Ancak 360 gün sonrasında görünür boşluk oranı gelişimi ile makro boşluk oranı gelişim eğrileri benzemektedir. Bu durum 360 gün yaşından sonrası için her iki deney sonuçlarının birbiriyle ilişkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.29. Makro boşluk oranı ile görünür boşluk oranı sonuçlarının karşılaştırma grafikleri



Şekil 4.30. BT deney numunelerinin HU değerleri gelişimi ile görünür özgül ağırlık sonuçlarının karşılaştırma grafikleri

Şekil 4.30'da görünür özgül ağırlık gelişimi ile BT'de görüntülenen numunelerin HU değerlerinin (yoğunluğunun) gelişimi arasındaki karşılaştırma grafiği verilmiştir. Şekle göre CEM I ve SRC harç numunelerinin HU yoğunluk gelişimi ile görünür özgül ağırlık gelişimleri birbirine benzer eğriler oluşturmuştur. Özellikle sülfata maruz harç numunelerin HU yoğunluk gelişimleri ile görünür özgül ağırlık gelişimleri arasında ters orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

5.1.1. Boy değişimi

- En az genleşme oranı her iki çimento tipi için su içinde bekleyen harç numunelerde gözlenmiştir.
- En fazla genleşme oranı CEM I çimento harçları için Na_2SO_4 çözeltisi içinde, SRC çimento harçları için MgSO_4 çözeltisi içindeki numunelerde gözlenmiştir.
- 52 hafta (360 gün) sonunda %0,1 genleşme oranını aşan MgSO_4 ve Na_2SO_4 çözeltilerine maruz CEM I çimento harçlarının yüksek sülfat direncine sahip olmadığı belirlenmiştir.
- 52 hafta (360 gün) sonunda %0,1 genleşme oranının altında kalan MgSO_4 ve Na_2SO_4 çözeltilerine maruz SRC çimento harçlarının yüksek sülfat direncine sahip olduğu belirlenmiştir.

5.1.2. Basınç dayanımı

- En yüksek basınç dayanımı 28 gün sonunda 51,1 MPa ve 560 gün sonunda 66,1 MPa ile su içinde kürü yapılan CEM I harç numunelerinde elde edilmiştir.
- Basınç dayanımı yönünden en fazla kayba uğrayan numune grubu Na_2SO_4 çözeltilerine maruz CEM I çimento harçlarıdır.
- Basınç dayanımı kaybı en fazladan en aza doğru sırasıyla PNB, PMB, SNB, SMB olarak elde edilmiştir.
- Sülfata maruz CEM I harçlarının ilk 130 günlük süreçte basınç dayanımları azalarak artmaktadır. 130 gün yaşında en yüksek basınç dayanımına ulaşan harç numuneler sonraki süreçte basınç dayanımlarında hızla azalma göstermektedir.

- Su içinde bekletilen SRC çimento harçları 28 gün sonunda ortalama 37,2 MPa 560 gün sonunda ise ortalama 56,2 MPa değerine ulaşarak SRC çimento harçları içinde en yüksek basınç dayanımı SSB numunelerinde elde edilmiştir.
- Na_2SO_4 çözeltisinin en fazla basınç dayanımı kaybına sebep olduğu görülmüştür. Bu sebeple genel olarak Na_2SO_4 etkilerinin MgSO_4 'a göre daha hızlı ve saldırgan olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- 560 günlük süreçte basınç dayanımı yönünden SRC çimentosunun CEM I çimentosuna göre sülfata daha dayanıklı çimento tipi olduğu ispatlanmıştır.

5.1.3. Su emme

- 560 günlük süreçte ağırlıkça su emme oranı su içinde bekletilen numunelerde azalırken, sülfata maruz harç numunelerde artış göstermiştir.
- En fazla ağırlıkça su emen numune grubu PNS harç numuneleridir. Bundan sonra sırasıyla PMS, SNS ve SMS harç numuneleri gelmektedir.
- Kuru özgül ağırlıktaki en fazla artış PSS harç numunelerinde olmuştur. Sonrasında sırasıyla SSS, SMS, SNS, PMS ve PNS harç numuneleri gelmektedir.
- Görünür özgül ağırlıktaki en fazla artış sülfata maruz harç numunelerde görülmüştür.
- Görünür boşluk oranındaki en fazla kayıp PNS harç numunelerinde olmuştur. Sonrasında sırasıyla PMS, SNS, SMS, SSS ve PSS harç numuneleri gelmektedir.
- Deney sonuçlarına göre Na_2SO_4 çözeltisinin etkileri MgSO_4 'a göre daha fazladır.

5.1.3. Kapiler su emme

- 270 günlük süreçte en fazla kapiler su emme katsayısı PNK numune grubunda gözlenmiştir.
- 270 günlük süreçte en fazla kapiler su emme değeri Na_2SO_4 'a maruz harç numunelerinde görülmüştür.
- MgSO_4 'a maruz harçlar en az kapiler su emme değerlerine sahip olan numune grubudur.
- Su içinde bekletilen numunelerde kapiler su emme değerleri her süreçte artmıştır.

5.1.4. BT ile makro boşluk gelişimi analizi

- X ışını radyasyonuna maruz harç numunelerde 560 gün yaşında gerçekleştirilen su emme deneylerinde en yüksek ağırlıkça su emme ve görünür boşluk oranı PNT numunelerinde elde edilmiştir. SRC çimento harçlarının CEM I çimento harçlarına göre daha az ağırlıkça su emme oranına sahip olduğu görülmüştür. Görünür boşluk oranları karşılaştırıldığında en az orana sahip olanlar PST ve SST numuneleridir.
- BT görüntülerinde CEM I ve SRC harç numunelerinin eşik HU değerleri 1740 – 1760 arasında değişmektedir.
- PST harç numunelerin makro boşluk oranları 120 gün yaşına kadar azalmakta, sonrasında 270 gün yaşına kadar düşük bir artışla, 270 gün yaşından sonra daha hızlı bir artışla gelişimine devam etmiştir.
- CEM I çimento harçları için hesaplanan makro boşluk oranlarının gelişiminde en düşük oran PST numunelerinde görülmüştür.
- PMT harç numunelerinin makro boşluk oranı 180 gün yaşına kadar azalma, sonrasında artış eğilimi göstermiştir.
- Na₂SO₄ çözeltisi içinde bekletilen CEM I harç numunelerin ortalama makro boşluk oranları 270 gün yaşına kadar azalmış, sonrasında artış göstermiştir.
- CEM I çimentoları için makro boşluk oranı gelişiminde en yüksek artış sırasıyla PNT, PMT ve PST numunelerinde gözlenmiştir.
- SST harç numunelerin makro boşluk ortalama oranları 120 gün yaşına kadar azalmakta, sonrasında artışla gelişimine devam etmiştir.
- SMT harç numunelerinin ortalama makro boşluk oranları 120 gün yaşına kadar azalmış, sonrasında artış göstermiştir.
- SNT harç numunelerinin ortalama makro boşluk oranları 270 gün yaşına kadar azalmış, sonrasında artış göstermiştir.
- Makro boşluk oranı gelişiminde en yüksek artış ortalama PNT harç numunelerinde gözlenmiştir.
- Tüm harç numunelerin HU değerleri 180 gün yaşına kadar artış göstermiş sonrasında ani olarak azalmıştır.

- 2 gün yaşındaki tüm harç numunelerin HU değerleri yaklaşık olarak 2000 civarlarındadır.
- 560 gün yaşındaki tüm harç numunelerin HU değerleri 1900 civarlarına gerilemiştir.
- En yüksek ortalama HU değeri SRC çimento harçlarında elde edilmiştir.
- 28 gün yaşındaki PST harç numunelerinin gözeneklerinde yoğun etringit oluşumuna rastlanırken, aynı süreçte SST harç numunelerinin gözeneklerinde kalsiyum alümina silikat oluşumlarına rastlanılmıştır.
- 180 gün yaşındaki PST harç numunelerinin bazı gözeneklerinde az miktarda kristal oluşumuna rastlanırken, bazı gözeneklerinde yoğun portlandit kristalleri ve kristal aralarında etringit oluşumları gözlemlenmiştir. SST harç numunelerinin gözeneklerinde ise SEM görüntülerinde örneklediği gibi bir kısım gözenekte yoğun portlandit kristali ile etringit oluşumları gözlemlenirken, özellikle çapı küçük olan ve derin gözeneklerde yoğun portlandit oluşumlarına rastlanılmıştır.
- 28 gün yaşındaki PNT çimento harçlarının gözeneklerinde SNT harç numunelerine göre daha fazla oranda portlandit olduğu, ancak etringit kristallerinin SNT gözenek çeperlerinde daha fazla olduğu görülmüştür.
- 180 gün yaşındaki numunenin SEM görüntülerine göre PNT ve SNT çimento harçlarının gözeneklerin çoğunluğu portlandit ve etringit kristalleri ile dolmuştur.
- 28 gün yaşındaki PMT ve SMT numunelerinin SEM görüntülerine göre yoğun brusit oluşumu gözlenmiştir. Ayrıca 28 gün yaşında her iki numunede oluşan portlandit ve etringit kristalleri görülmektedir.
- 180 gün yaşındaki PMT ve SMT numunelerinin SEM görüntülerine göre PMT ve SMT numunelerinin gözeneklerinde yoğun portlandit ve yoğun etringit oluşumları göze çarpmaktadır.

Araştırmadan elde edilen genel sonuç, BT yönteminin çimentolu harçların basınç dayanımı, su emme, kapiler su emme, görünür boşluk oranı ve boy değişim deneyleri ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Ayrıca BT'nin sülfata maruz kalan çimento harçlarının makro boşluk yapısı gelişiminin belirlenmesinde tahribatsız bir yöntem olarak kullanılabilir ve 625 µm mertebesinde hassasiyete sahip bir deney yöntemi olduğu belirlenmiştir.

5.2. Öneriler

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre bu konuda yapılacak daha sonraki araştırmalara ışık tutması için maddeler halinde birkaç öneri sunulmuştur:

- Çalışma yapılırken ortam koşulları ve numunenin nem durumu için mutlaka her bir BT görüntüleme öncesinde eşit koşullar oluşturulmalı ve numuneler BT'nin lazer çizgileriyle her süreçte aynı eksen üzerinde olmasına dikkat edilmelidir.
- Artefakt oluşumlarını azaltabilme amacıyla yüksek enerjili ışınlar kullanılmalıdır. (120 kv<, ve 400 mA<)
- Uzun süreli x-ışınına maruz kalan numunelerde yapısal, fiziksel ve mekanik davranışlardaki değişimler özellikle iyi incelenmeli ve bu konuda ek çalışmalar yapılmalıdır.
- Boy değişimi deneylerinde özellikle ASTM 1012 prosedürü iyi takip edilmeli, ancak burada belirtildiği gibi numunelerin yerleşimine dikkat edilmelidir. Numunelerin dik yerleşiminde eğer bir kayma ya da düşeyle bir açı oluşacak şekilde numuneler saklanıyorsa numunelerde ileriki süreçlerde eğilme davranışı gerçekleşmektedir. Bunu engellemek için bu çalışmada denenen çözelti içindeki harç çubuklarının belli bir yükseklikten asılarak ölçümlerin yapılmasının daha sağlıklı sonuçlar verdiği düşünülmektedir.
- BT yönteminin beton malzeme için de tahribatsız bir yöntem olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Erdoğan, T.Y., “Beton”, **METU Press**, Ankara, 11-61(2003).
2. Postacıoğlu, B., “Beton Cilt:1”, **Teknik Kitaplar Yayınevi**, İstanbul, 38-40(1986).
3. Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M. ve Uyan, M., “Her Yönüyle Beton”, **Türkiye Hazır Beton Birliği**, İstanbul, 17-19 (1999).
4. Mindness, S. ve Young, J.F., “Concrete 2nd ed.”, **Prentice-Hall Inc.**, USA, 15-21 (2003).
5. Gani, M.S.J., “Cement and Concrete”, **Chapman & Hall**, UK, 13-23 (1997).
6. Yalçın, H. ve Gürü, M., “Çimento ve Beton”, **Palme Yayıncılık**, 15-40 (2006).
7. Neville, A.M., “Properties of Concrete 3rd ed.”, **Longman Scientific & Technical**, England, 25-39 (1981).
8. Ramahandran, V.S., “Concrete Admixtures Handbook”, **Noyes Publication**, New Jersey, USA, 5-30 (1995).
9. Çimhol A.Ş., “Çimento Teknolojisi Teknik Eğitim”, **Çimhol A.Ş. Yayınları No.2**, 15-16 (1989).
10. Skalny, J.; Marchand, J.; ve Odler, I., “Sulfate Attack on Concrete”, **Spon Press**, (2002).
11. Mehta, P. K; ve Monteiro, P. J. M., “Concrete: Microstructure, Properties and Materials 3rd ed.”, **McGraw Hill**, (2006).
12. Mehta, P. K, “Concrete technology for sustainable development - An overview of essential principles”, **Proceedings of Concrete Technology for Sustainable Development in The 21st Century**, India, Feb., Ed. P.K Mehta (1999).
13. Pommersheim, J. M.; ve Clifton, J. R., “Sulfate attack of cementitious materials: volumetric relations and expansions”, **NISTIR 5390**, Building And Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology (1994).
14. Cohen, M. D.; ve Mather, B., “Sulfate attack on concrete- research needs”, **ACI Materials Journal**, 88 (1): 62-69 (1991).
15. Harboe, E. M., “Longtime studies and field experiences with sulfate attack”, Sulfate resistance of concrete, **ACI SP-77**, 1 -20 (1982).
16. St John, D. A., “An unusual case of ground water sulphate attack on concrete”, **Cement and Concrete Research**, 12: 633-639 (1982).
17. Tulliani, J., Montanaro, L., Negro, A., ve Collepardi, M., “Sulfate attack of concrete building foundations induced by sewage waters”, **Cement and Concrete Research**, 32: 843-849 (2002).
18. Xu, A., Shayan, A., ve Baburamani, P., “Test methods for sulfate resistance of concrete and mechanism of sulfate attack”, **ARRB Transport Research**, Review Report 5 (1998).

19. Ferraris, C. F.; Clifton, J. R; Stutzman, P. E.; ve Garboczi, E.J., "Mechanisms of degradation of Portland cement-based systems by sulfate attack", Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems, Ed: K. L. Scrivener ve J. F. Young, *E & FN Spon* 185-192 (1997).
20. Reinhardt, H. W., "Transport of chemicals through concrete", *Materials Science of Concrete III*, Ed: Jan Skalny, 209-241 (1992).
21. Santhanam, M.; Cohen, M. D.; and Olek, J., "Sulfate attack research-whither now?" *Cement and Concrete Research*, 31: 845-851 (2001).
22. Hime, W. G.; and Mather, B., "Sulfate attack or is it?" *Cement and Concrete Research*, 29: 789-791 (1999).
23. Hooton, R.D., "Are Sulfate Resistance Standards Adequate?" Material Science of Concrete: Sulfate Attack Mechanisms, *American Ceramic Society*, 357-366 (1999).
24. Skalny, J., ve Marchand, J., "Sulfate attack on concrete revisited", Science of cement and concrete, *Proceeding of Kurdowski Symposium*, Ed: W. Kurdowski ve M. Gawlicki, 171-187 (2001).
25. Naik, N., "Sulfate attack on Portland cement-based materials: Mechanisms of damage and long-term performance", *Georgia Institute of Technology, PhD Thesis*, August (2003).
26. Arslan, M., "Beton", *Atlas Yayınevi*, İstanbul (2001).
27. Yaman, I.O., Hearn, N. ve Aktan, H.M., "Active and non-active porosity in concrete Part I: Experimental evidence", *Materials and Structures*, 35: 102-109 (2002).
28. Yaman, I.O., Hearn, N. ve Aktan, H.M., "Active and non-active porosity in concrete Part II: Evaluation of existing models", *Materials and Structures*, 35: 110-116 (2002).
29. Jennings, H.M., Thomas J.J., Rothstein D, Chen J.J., "Cements As Porous Material", Northwestern Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, *Ders Notları*, USA (2001).
30. Diaz, B., Freire, L., Merino, P., Novoa, X.R. ve Perez, M.C., "Impedance spectroscopy study of saturated mortar samples", *Electrochimica Acta*, 53 (25): 7549-7555 (2008).
31. Batis, G., Pantazopoulou, P., Tsivilis, S. ve Badogiannis, E., "The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars", *Cement and Concrete Composites* 27: 125-130 (2005).
32. Pandey, S.P. ve Sharma, R.L., "The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar", *Cement and Concrete Research*, 30: 19-23 (2000).
33. Tekin, İ., "Çimento harçlarının porozitesinin bilgisayarlı tomografi ile belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi , (2005).

34. Tekin, İ., Birgül, R., Aruntaş, H.Y., Bilgisayarlı tomografi cihazının çimento harcındaki boşlukların gelişiminin belirlenmesinde kullanılması, **3. International Symposium of Sustainability in Cement and Concrete**, TÇMB, 553-562 (2007).
35. Aziz, M.A.E., Aleem, S.A E., Heikal, M. ve Didamon, H.E., “Hydration and durability of sulphate-resisting and slag cement blends in Caron’s Lake water”, **Cement and Concrete Research**, 35: 1592– 1600 (2005).
36. Saitoa, H. ve Deguchi, A., “Leaching tests on different mortars using accelerated electrochemical method”, **Cement and Concrete Research**, 30: 1815-1825 (2000).
37. Nehdi, M. ve Hayek M., “Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity”, **Cement and Concrete Research**, 35: 731–742 (2005).
38. Malami, Ch., Kaloidas, V., Batis G. ve Kouloumbi, N., “Carbonation and porosity of mortar specimens with pozzolanic and hydraulic cement admixtures”, **Cement and Concrete Research**, 24 (8): 1444-1454 (1994).
39. Ramachandran, V.S. ve Beaudoin, J.J., “Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology”, **William Andrew Publishing**, US, 528-629 (2001).
40. Popovichs, S., “Relationship between composition and strength of concrete” Strength and Related Properties of Concrete - A Quantitative Approach, **John Wiley and Sons**, New York, 370-390 (1997).
41. Roberts, L.R. “Air Content, Temperature, Unit weight, and Yield” Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, **ASTM STP169C**, 65-101 (1994).
42. Shah, S.P., “Future development in high performance concrete”, **Proceedings of the 11. European Ready Mixed Concrete Congress**, İstanbul, 53-72 (1995).
43. Igarashi, S., , Watanabe A. ve Kawamura M., “Evaluation of capillary pore size characteristics in high-strength concrete at early ages”, **Cement and Concrete Research**, 35 (3): 513-519 (2005).
44. Nambiara, E.K.K. ve Ramamurthy, K., “Air-void characterization of foam concrete”, **Cement and Concrete Research**, 37 (2): 221-230 (2007).
45. Aruntas, H. Y., Tekin, İ. ve Birgül, R., “Determining Hounsfield Unit values of mortar constituents by computerized tomography”, **Measurement**, 43: 410–414 (2010).
46. Stock, S.R., Naik, N.K., Wilkinson, A.P. ve Kurtis, K.E., “X-ray micro tomography (microCT) of the progression of sulfate attack of cement paste”, **Cement and Concrete Research**, 32: 1673–1675 (2002).
47. Naik, N.N., Jupe, A.C., Stock, S.R., Wilkinson, A.P., Leed, P.L. ve Kurtis, K.E., “Sulfate attack monitored by microCT and EDXRD: Influence of cement type, water-to-cement ratio, and aggregate”, **Cement and Concrete Research**, 36 (1): 144-159 (2006).

48. Martz, H. E., Roberson, G. P., Skeate, M. F., Schneberk, D. J. ve Azevedo, S. G., "Computerized tomography studies of concrete samples", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 58 (2): 216-226 (1991).
49. Martz, H.E., Schneberk, D.J., Roberson, G.P. ve Monteiro, P.J.M., "Computerized tomography analysis of reinforced concrete", *Materials Journal*, 90 (3): 259-264 (1993).
50. Morgan, I. L., Ellinger, H., Klinksiek, R., ve Thompson, J. N., "Examination of concrete by computerized tomography", *ACI Journal Proceedings*, 77 (1): 23-27 (1980).
51. Chotard, T.J., Bonceur-Martel, M.P, Smith, A., Dupuy, J. P. ve Gault, C., "Application of x-ray computed tomography to characterize the early hydration of calcium aluminate cement", *Cement and Concrete Composites*, 25: 145-152 (2003).
52. Garboczi, E.J., "Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: Application to aggregates used in concrete", *Cement and Concrete Research*, 32: 1621-1638 (2002).
53. Landis, E.N., Nagy, E.N. ve Keane, D.T., "Microstructure and fracture in three dimensions", *Engineering Fracture Mechanics*, 70: 911-925 (2003).
54. Landis, E. N., Zhang, T., Nagy, E. N., Nagy, G. ve Franklin, W. R., "Cracking, damage and fracture in four dimensions", *Materials and Structures*, 13: 357-364 (2006).
55. Landis, E.N. ve Corr, D.J., "Three dimensional analysis of air void systems in concrete", *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties An International Symposium*, 517-524, U.S.A. (2007).
56. Helfen, L., Dehn, F., Mikulik, P. ve Baumbach, T., "Three-dimensional imaging of cement microstructure evolution during hydration", *Advances in Cement Research*, London, 17 (3): 103-111 (2005).
57. Elaqra, H, Godin, N., Peix, G., Mili, M.R. ve Fantozzi, G., "Damage evolution analysis in mortar, during compressive loading using acoustic emission and X-ray tomography: Effects of the sand/cement ratio" *Cement and Concrete Research*, 37: 703-713 (2007).
58. Saleh, H., "The use of x-ray computed tomography (CT) techniques to study the internal structures of concrete", *2nd MENDT Proceedings*, www.ndt.net, 9: 6 (2004).
59. Hunter, O.K., "Characterization of pore structure and crack propagation in concrete using x-ray computed tomography", *Faculty of the Graduate School of the University of Maryland*, M.S. Thesis, USA, (2004).
60. Wong, R.C.K. ve Chau, K.T.; "Estimation of air void and aggregate spatial distributions in concrete under uniaxial compression using computer tomography scanning", *Cement and Concrete Research*, 35: 1566-1576 (2005).

61. Boel, V., Cnudde, V., Schutter, G.De. ve Jacobs, P., “Exploring the potential of X-ray tomography in micro structural studies of cementitious systems” **2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering**, USA (2006).
62. Rattanasak, U. ve Kendall, K., “Pore structure of cement/pozzolan composites by X-ray micro tomography”, **Cement and Concrete Research**, 35 (4): 637-640 (2005).
63. Takashi, H., “Evaluation of calcium leaching in concrete using high-intensity x-ray CT”, **Spring**, Industrial Applications, (8): 131-132 (2006).
64. Çalışkan, S., “Examining concrete cores by non-destructive techniques”, **4th Middle East NDT Conference and Exhibition**, Kingdom of Bahrain, (2007).
65. TS EN 197-1 “Genel Çimentolar – Bölüm 1: Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, **Türk Standartları Enstitüsü** (2002).
66. Tokyay, M. ve Dilek, F.T., “Mineral katkılı çimentolu sistemlerin sülfata dayanıklılığı”, **Tübitak Araştırma Projesi Raporu**, İntag-645 (2003).
67. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., “Betonarme Yapılarda Kalıcılık”, **Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları**, İzmir (2002).
68. Romain, J.C. ve Sarkar, S.L., “21. Yüzyılın çimentoları”, **Çimento ve Beton Dünyası**, 5 (30): 36-45 (2001).
69. TS 10157, “Çimento - Sülfata dayanıklı çimento – Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri”, **Türk Standartları Enstitüsü** (2002).
70. ASTM C150 / C150M – 09, “Standard Specification for Portland Cement”, **Annual Book of ASTM Standards** (2002).
71. Lea, “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete 4th ed.”, Ed: P. C. Hewlett, **Wiley Publishing**, NewYork (1998).
72. Ustabaş, İ., “Sülfat etkisine maruz mineral katkılı beton ve harçların performansının incelenmesi”, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Doktora Tezi, (2008).
73. Taylor, H.F.W., “Cement Chemistry 2nd ed.”, **Thomas Telford Edition Published**, Londra (1997).
74. Collepardi, M., “A state-of-the art on delayed ettringite attack on concrete”, **Cement and Concrete Composites**, 25: 401-407 (2003).
75. Taylor, H.F.W., Famy, C. ve Scrivener, K.L., “Delayed ettringite formation”, **Cement and Concrete Research**, 31: 683-693 (2001).
76. Fu, Y. ve Beaudoin, J.J., “Mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cement systems” **ACI Material Journal**, 93 (4): 327- 333 (1996).
77. Fu, Y., Ding, J. ve Beaudoin, J.J., “Microcracking as a precursor to delayed ettringite formation in cement systems”, **Cement and Concrete Research**, 26 (10): 1493-1498 (1996).

78. Batic, O.R., Milanesi, C.A., Maiza, P.J. ve Marfil, S.A., "Secondary ettringite formation in concrete subjected to different curing condition", *Cement and Concrete Research*, 30: 1407-1412 (2000).
79. Divet, L. ve Randriambololona, R., "Delayed ettringite formation: the effect of temperature and basicity on the interaction of sulfate and C-S-H phase", *Cement and Concrete Research*, 28: 357-363 (1998).
80. Pavoine, A., Divet, L. ve Fenouillet, S., "A concrete performance test for delayed ettringite formation: part I optimization", *Cement and Concrete Research*, 36: 2138-2143 (2006).
81. Yang, R. ve Lawrence, C.D., "Delayed ettringite formation in heat-cured portland cement mortars", *Cement and Concrete Research*, 29: 17-25 (1999).
82. Diamond, S., "Delayed Ettringite Formation", *Cement and Concrete Composites*, 18: 205-215 (1996).
83. Santhanam, M., Cohen, M.D. ve Olek, J., "Effect of gypsum formation on the performance of cement mortars during external sulfate attack", *Cement and Concrete Research*, 32: 325-332 (2003).
84. Diamond, S. ve Lee, R.J., "Microstructural alterations associated with sulfate attack in permeable concretes", *American Ceramic Society*, 123-174 (1999).
85. Mehta, P.K., "Sulfate attack on concrete – A critical review", Materials Science of concrete III, *American Ceramic Society*, Westerville (1992).
86. Mehta, P.K., "Mechanism of sulfate attack on Portland cement concrete – Another look", *Cement and Concrete Research*, 13: 401-406 (1983).
87. Thomas, M.D.A., Rogers, C.A. ve Bleszynski, R.F., "Occurrences of thaumasite in laboratory and field concrete", *Cement and Concrete Research*, 25: 1045-1050 (2003).
88. Irassar, E.F., Gonzalez, M. ve Rahhal, V., "Sulfate resistance of Type V cement with limestone filler and natural pozzolana", *Cement and Concrete Composites*, 22: 361-368 (2000).
89. Monterio, P.J.M. ve Kurtis, K.E., "Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack", *Cement and Concrete Research*, 33: 987-993 (2003).
90. Brown, P., ve Hooton, R.D., "Ettringite and thaumasite formation in laboratory concretes prepared using sulfate-resisting cements", *Cement and Concrete Composites*, 24: 61-370 (2002).
91. Thomas, M.D.A., Shehata, M.H., Shashiprakash, S.G., Hopkins, D.S. ve Cail, K., "Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete", *Cement and Concrete Research*, 29: 1207-1214 (1999).
92. Al-Amoudi, O.S.B., "Attack on plain and blended cement exposed to aggressive sulfate environments", *Cement and Concrete Composites*, 24: 305-316 (2002).
93. Bonen, D. ve Cohen, M.D., "Magnesium sulfate attack on portland cement paste: microstructural analysis", *Cement and Concrete Research*, 22: 169-180 (1992).

94. Brown, P., ve Hooton, R.D., "Ettringite and thaumasite formation in laboratory concretes prepared using sulfate-resisting cements", *Cement and Concrete Composites*, 24: 61-370 (2002).
95. Türker, F., Aköz, F., Koral, S. ve Yüzer, N., "Effect of magnesium sulfate concentration on sulfate resistance of mortars with and without silica fume", *Cement and Concrete Research*, 27 (2): 205-214 (1997).
96. Collett, G., Crammond, N.J., Swamy, R.N. ve Sharp, J.H., "The role of carbon dioxide in formation of thaumasite", *Cement and Concrete Research*, (24): 1599-1612 (2004).
97. Crammond, N.J., "The thaumasite form of sulfate attack in the UK", *Cement and Concrete Composites*, 25: 809-818 (2003).
98. ACI 201.2R-08, "Guide to Durable Concrete", *American Concrete Institute* (2008).
99. <http://www.mindat.org/min-1414.html>.
100. Casanova, I., Aguado, A. ve Agulló, L., "Aggregate expansivity due to sulfide oxidation — II. Physico-chemical modeling of sulfate attack", *Cement and Concrete Research*, 27 (11) 1627-1632 (1997).
101. <http://www.cement.org/bookstore>.
102. Colleparidi, M. ve Olagot, JJO, "The influence of sulfate content in clinker or cement and curing temperature on DEF related expansion of concrete", *International Rilem TC 186-ISA workshop on internal sulfate attack and delayed ettringite formation*, Switzerland (2002).
103. Rasheeduzzafar, "Influence of cement composition on concrete durability", *ACI materials Journal*, 89 (6): 574-586 (1992).
104. Ping, X. ve Beaudoin, J.J., "Mechanism of sulfate expansion: I. Thermodynamic principle of crystallization pressure", *Cement and Concrete Research*, 22: 631– 640 (1992).
105. Gollop, R S., ve Taylor, H. F. W., "Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. I. Ordinary Portland cement paste", *Cement and concrete research*, 22: 1027-1038 (1992).
106. Gollop, R S., ve Taylor, H. F. W., "Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. II. Sulfate-resisting Portland cement: Ferrite composition and hydration chemistry", *Cement and concrete research*, 24 (7): 1347-1358 (1994).
107. Gollop, R S., ve Taylor, H. F. W., "Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. III. Sulfate-resisting Portland cement: Reaction with sodium and magnesium sulfate solutions", *Cement and concrete research*, 25 (7): 1581-1590 (1995).
108. Tian, B. ve Cohen, M.D., "Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?" *Cement and Concrete Research*, 30 (1): 117-123 (2000).

109. Irassar, E. F., Maio, A. D. ve Batic, O. R., "Sulfate attack on concrete with mineral admixtures", *Cement and Concrete Research*, 26 (1): 113-123 (1996).
110. Biczok, I., Concrete Corrosion and Concrete Protection, *Chemical Publishing Company*, NY (1967).
111. González, M. A. ve Irassar, E. F., "Ettringite formation in low C₃A portland cement exposed to sodium sulfate solution", *Cement and Concrete Research*, 27 (7): 1061-1072 (1997).
112. Aköz, F., Türker, F., Koral, S. ve Yüzer, N., "Effects of sodium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume", *Cement and Concrete Research*, 25 (6): 1360-1368 (1995).
113. Al-Dulaijan, S.U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M.M., Sharif, A.M., Shameen, M. ve Ibrahim, M., "Sulphate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulphates", *Cement Concrete Composites*, 25: 429-437 (2003).
114. Santhanam, M., Cohen, M.D. ve Olek, J., "Mechanism of sulfate attack: A fresh look: Part 1: Summary of experimental results", *Cement and Concrete Research*, 32 (6): 915-921 (2002).
115. Clark, B.A. ve Brown, P.W., "Formation of ettringite from tricalcium aluminate and magnesium sulfate", *Advances in Cement Research*, 12 (4): 137-142 (2000).
116. Gabrisová, A., Havlica, J. ve Sahu, S., "Stability of calcium sulhoaluminate hydrates in water solutions with various pH values" *Cement and Concrete Research*, 21 (6): 1023-1027 (1991).
117. Min, D. ve Mingshu, T., "Formation and expansion of ettringite crystals", *Cement and Concrete Research*, 24 (1): 119-126 (1994).
118. Khatri, R. P., Sirivivatnanon, V. ve Yang J. L., "Role of permeability in sulphate attack" *Cement and Concrete Research*, 27 (8): 1179-1189 (1997).
119. Cao, H.T., Bucea, L., Ray, A. ve Yozghatlian, S., "The effect of cement composition and pH of environment on sulfate resistance of Portland cements and blended cements" *Cement and Concrete Composites*, 19 (2): 161-171 (1997).
120. Ping, X. ve Beaudoin, J.J., "Mechanism of sulfate expansion: II. Validation of thermodynamic theory", *Cement and Concrete Research*, 22: 845– 854 (1992).
121. Lawrence, C.D., "Sulphate attack on concrete", *Magazine of Concrete Research*, 42 (153): 249–264 (1990).
122. Hekal, E.E., Kishar, E. ve Mostafa, H., "Magnesium sulphate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances", *Cement and Concrete Research*, 32: 1421-1427 (2002).

123. Irassar, E.F., González, M. ve Rahhal, V., "Sulphate resistance of Type V cements with limestone filler and natural pozzolana", *Cement and Concrete Composites*, 22 (5): 361-368 (2000).
124. Kılınç, K. ve Uyan, M., "Beton karışım suyundaki sülfat tuzlarının çimento harcı özelliklerine etkisi", *5.Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul (2003).
125. Haynes, H., "Sulfate attack on concrete: Laboratory vs. field experience", *Concrete International*, 24: 7 (2002).
126. Bonen, D.B. ve Cohen, M.D., "Magnesium sulfate attack on Portland cement paste-I Microstructural analysis", *Cement and concrete research*, 22: 169-180 (1992-1).
127. Bonen, D.B. ve Cohen, M.D., "Magnesium sulfate attack on Portland cement paste-II Chemical and mineralogical analysis", *Cement and concrete research*, 22: 707-718 (1992-2).
128. Santhanam, M., Cohen, M.D. ve Olek, J., "Mechanism of sulfate attack: A fresh look: Part 2: Proposed mechanisms", *Cement and Concrete Research*, 33: 341-346 (2003).
129. Santhanam, M.; Cohen, M.D. ve Olek, J., "Modeling the effects of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars", *Cement and concrete research*, 32: 585-592 (2002-1).
130. ASTM C452 – 06, "Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate", *Annual Book of ASTM Standards* (2002).
131. ASTM C 1012 – 95a, "Standard Test Method for Length Change of Hydraulic – Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution", *Annual Book of ASTM Standards* (2002).
132. Felekoglu, B., Ramyar, K., Tosun, K. ve Musal B., "Sulfate resistances of different types of Turkish Portland cements by selecting the asfropriate test methods", *Construction and Building Materials*, 20: 819–823 (2006).
133. Yazıcı, H., "Yüksek fırın cürufu katkılı harçların sülfat dayanıklılığının incelenmesi", *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8 (1): 51-58 (2006).
134. Goktepe, A.B., Inan, G., Ramyar, K. ve Sezer, A., "Estimation of sulfate expansion level of PC mortar using statistical and neural approaches", *Construction and Building Materials*, 20 (7): 441-449 (2006).
135. Ramyar, K. ve İn an, G., "Sodium sulfate attack on plain and blended cements", *Building and Environment*, 42 (3): 1368-1372 (2007).
136. Türkmen, İ., "Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag", *Materials Letters*, 57 (29): 4560-4569 (2003).

137. Mangat, P. S. ve Khatib, J. M., "Influence of Fly Ash, Silica Fume, and Slag on Sulfate Resistance of Concrete", *ACI Materials Journal*, 92 (5): 542-552 (1993).
138. Fraay, A.L.A., Reigersman, A., ve Pee, J.De, "Sulfate Resistance of Mortars with Pulverized Fuel Ash", *ACI Special Publication*, 100: 2041-2058 (1987).
139. Kurtis, K.E., Shomglin, K., Monteiro, P.M., Harvey, J. ve Roesler, I., "Accelerated tests for measuring resistance of calcium sulfoaluminate, calcium aluminate, and portland cements", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13 (3): 216-21 (2001).
140. Santhanam, M., Cohen, M. ve Olek, J., "Differentiating seawater and groundwater sulfate attack in Portland cement mortars", *Cement and Concrete Research*, 36 (12): 2132-2137 (2006).
141. Al-Dulaijan, S.U., "Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to magnesium sulfate solutions", *Construction and Building Materials*, 21 (8): 1792-1802 (2007).
142. Brown, P.W. ve Doerr, A., "Chemical changes in concrete due to the ingress of aggressive species", *Cement and Concrete Research*, 30 (3): 411-418 (2000).
143. Justnes, H., "Thaumasite formed by sulfate attack on mortar with limestone filler", *Cement and Concrete Composites*, 25 (8): 955-959 (2003).
144. Blanco-Varela, M.T., Aguilera, J. ve Martínez-Ramírez, S., "Effect of cement C₃A content, temperature and storage medium on thaumasite formation in carbonated mortars", *Cement and Concrete Research*, 36 (4): 707-715 (2006).
145. Demir, M., "Effect of pore size distribution on porosity measurement by computerized tomography", *The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of The Middle East Technical University*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, (2000).
146. Vinegar, H.J., "X-ray CT and NMR imaging of rocks", SPE15277, *Journal of Petroleum Technology*, Mart: 257-259, (1986).
147. <http://mc2.gulf-pixels.com/?p=281>.
148. Akın, S., Demiral, B. ve Okandan, E., "A novel method of porosity measurement utilizing Computerized Tomography", *In situ*, 20 (4): 347-365 (1996).
149. Wellington, S.L. ve Vinegar, H.J., "X-Ray Computerized Tomography", SPE 16983, *Journal of Petroleum Technology*, August: 885-898 (1990).
150. Tuncel, E., "Klinik Radyoloji", *Nobel & Güneş*, İstanbul, 230-352 (2002).
151. Hunt, P.K., Engier, P. ve Basjarowicz, C., "Computed Tomography as a core analysis tool: Application, Instrument evaluation and image improvement techniques", SPE 16952, *Journal of petroleum technology*, Sep: 1203-10 (1988).

152. Hove, A.O., Ringen, J.K. ve Read, P.A., “Visualization of laboratory corefloods with the aid of Computerized Tomography”, SPE 13654, **SPE Research Engineering**, May: 148-54 (1987).
153. Withjack, E.M., “Computed Tomography for rock-property determination and fluid-flow visualization”, SPE 16951, **SPE Formation Evaluation**, Dec: 698-704 (1988).
154. Saner, S., “A review of computer tomography and petrophysical applications”, **Sabbatical Research**, (1993-1994).
155. Vinegar, H.J. ve Wellington, S.L., “Tomographic imaging of three phase flow experiments”, **Review of Scientific Instruments**, 58 (1): 96-107 (1987).
156. Tekin, İ. ve Aruntaş, H.Y., “Çimentolu sistemlerde Bilgisayarlı Tomografi kullanımı”, **Yapı Dünyası**, 162: 50 (2009).
157. Gallucci, E., Scrivener K., Groso, A., Stampanoni, M., Margaritondo, G., “3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μ CT)”, **Cement and Concrete Research**, 37: 360-368 (2007).
158. ASTM E1441 – 00, “Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging”, **ASTM International** (2005).
159. ASTM E1570 - 00e1, “Standard Practice for Computed Tomographic (CT) Examination”, **ASTM International** (2005).
160. Oyar, O., “Radyolojide Temel Fizik Kavramlar”, **Nobel Tıp Kitabevleri**, İstanbul, 10-35 (1998).
161. Kaya, T., “Temel Radyoloji Tekniği”, **Güneş & Nobel**, 185-212 (1997).
162. Kumaş, A., “Radyasyon fiziği ve tıbbi uygulamaları”, **Palme Yayın Dağıtım**, 90-92 (2006).
163. Tuncel, E., “Radyolojide BT” Klinik Radyoloji, **Nobel & Güneş**, İstanbul 230-352 (2002).
164. TS EN 197-2 “Çimento – Bölüm 2: Uygunluk Değerlendirmesi”, **Türk Standartları Enstitüsü**, (2002).
165. TS EN 196-1 “Çimento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım Tayini”, **Türk Standartları Enstitüsü**, (2002).
166. TS EN 196-3, “Çimento Deney Metotları – Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Mart (2002).
167. ASTM C 157/C 157M, “Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete”, **American Society of Testing Methods**, USA (2002).
168. ASTM C 490-00a, “Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete”, **American Society of Testing Methods**, USA (2002).

169. TS 3624, “Sertleşmiş Betonda Özgöl Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu”, *Türk standartları Enstitüsü*, Ankara, (1981).
170. TS 4045, “Yapı Malzemelerinde Kapiler Su Emme Tayini”, *Türk standartları Enstitüsü*, Ankara, (1984).
171. Kocataşkın, F., "Yapı malzemesi bilimi", *Birsen Kitabevi*, İstanbul, 132 (1975).
172. Karihaloo, B.L. ve Jefferson, A.D., “Looking into concrete”, *Magazine of Concrete Research*, 53 (2): 135-147 (2001).
173. Birgul, R., “Monitoring macro voids in mortar by X-ray computed tomography”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 596 (3) (11): 459-466 (2008).
174. GE Healthcare, “Lightspeed VCT Technical Reference Manual”, English, Rev.9, *General Electric Company*, USA (2007).
175. Bayazıt, M. ve Oğuz, B. Y., “Mühendisler İçin İstatistik”, *Birsen Yayınevi*, Ocak (2005).
176. ASTM C1157 / C1157M – 10, “Standard Performance Specification for Hydraulic Cement”, *American Society of Testing Methods*, USA (2010).
177. Kasap, Ö., Şahmaran, M., Duru, K. ve Yaman, İ.Ö., “Sulfate Resistance of Blended Cements for Different Phases: Paste, Mortar and Concrete”, *3.rd International Symposium Sustainability in Cement and Concrete*, TÇMB, 563-572 (2007).
178. TS 500, “Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları”, *Türk standartları Enstitüsü*, Ankara, (2000).
179. Mobasher, B., Bonakdar, A. ve Anantharaman S., “Modelling of sulfate resistance of fly ash blended cement concrete materials” *2007 World of Coal Ash* (WOCA), Kentucky USA (2007).
180. Prasad, J., Jain, D.K., ve Ahuja, A.K., “Factors influencing the sulphate resistance of cement concrete and mortar”, *Asian Journal of Civil Engineering* (Building and Housing) 7 (3): 259-268 (2006).
181. Taud, H., Martinez-Angeles, R., Parrot, J.F. ve Hernandez-Escobedo, L., “Porosity estimation method by X-ray computed tomography”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 47: 209-217 (2005).
182. Salgueiro, W., Somoza, A., Cabrera, O. ve Consolatid, G., “Porosity study on free mineral addition cement paste”, *Cement and Concrete Research*, 34: 91–97 (2004).
183. Burlion, N., Bernard, D. ve Chena, D., “X-ray microtomography: Application to microstructure analysis of a cementitious material during leaching process”, *Cement and Concrete Research*, 36: 346 – 357 (2006).

EKLER

EK-1. Deney Resimleri



Tam otomatik mikser



Tam otomatik Vikat cihazı



Boy uzama kalıpları



Kullanılan malzemeler



Sarsma tablası



Boy uzama deney numuneleri

EK-1. (Devam) Deney Resimleri



Kür dolabının dış görünüşü



Şehir şebeke suyundaki harçlar



% 5 $MgSO_4$ çözeltisindeki harçlar



% 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçlar



(a)



(b)

Çimento harç çubuklarının boy değişimi deneyi

a. Kalibrasyon çubuğu ile boy ölçüm çerçevesi

b. Numune ile boy ölçüm çerçevesi

EK-1. (Devam) Deney Resimleri



Çelik kalıplar



Şok masasında çelik kalıp



Kür dolabının iç görünümü



Numune numaralandırması



Elmas uçlu taşınabilir testere ile numune kesimi



EK-1. (Devam) Deney Resimleri



Hidrolik pres



Harçların kırılma şekilleri



(a)



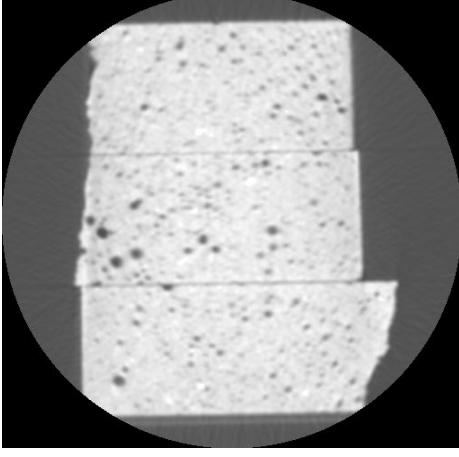
(b)

Kapiler su emme deney düzeneği (a) Üst görünüm (b) Yan görünüm

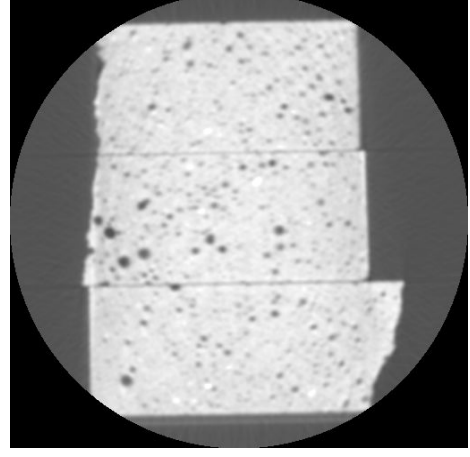


Tomografi numunelerinin kalıptan çıkarıldıktan sonraki görüntüleri

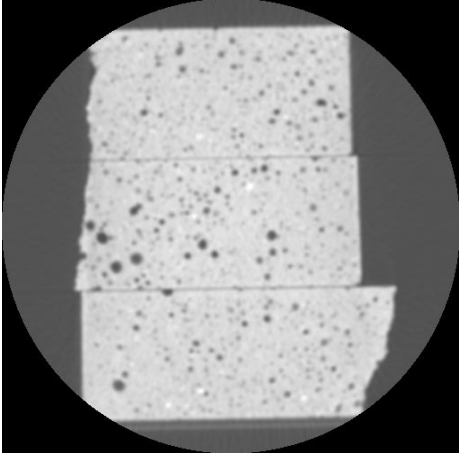
EK-2. BT Kalibrasyon Görüntüleri



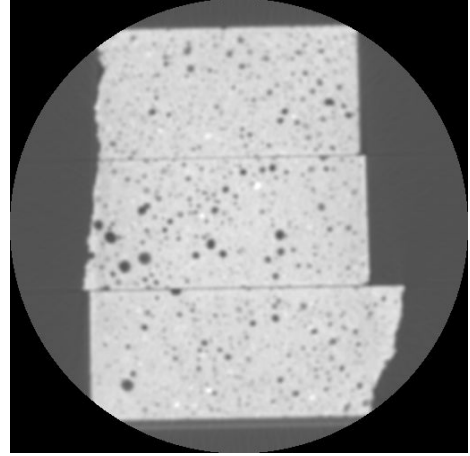
80 keV 200 mA 1,25 mm Axial tarama



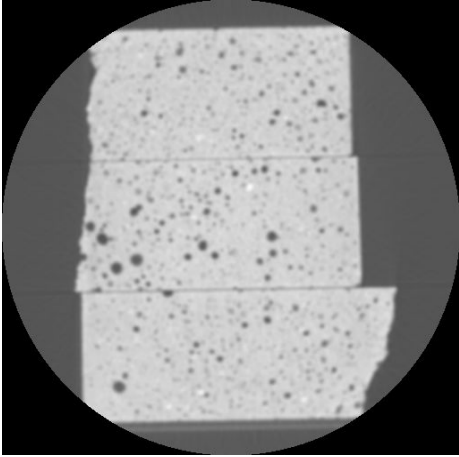
80 keV 400 mA 1,25 mm Axial tarama



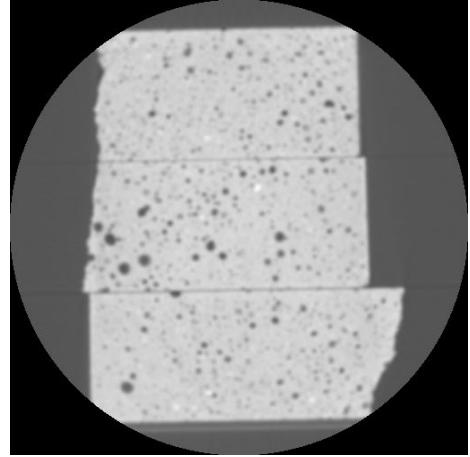
100 keV 200 mA 1,25 mm Axial tarama



100 keV 400 mA 1,25 mm Axial tarama

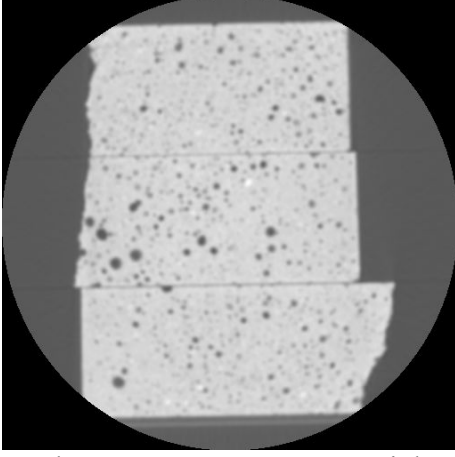


120 keV 200 mA 1,25 mm Axial tarama

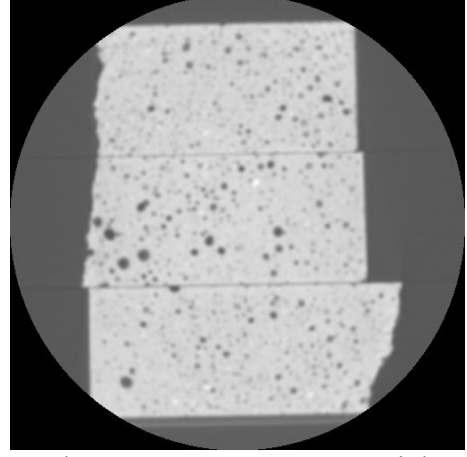


120 keV 400 mA 1,25 mm Axial tarama

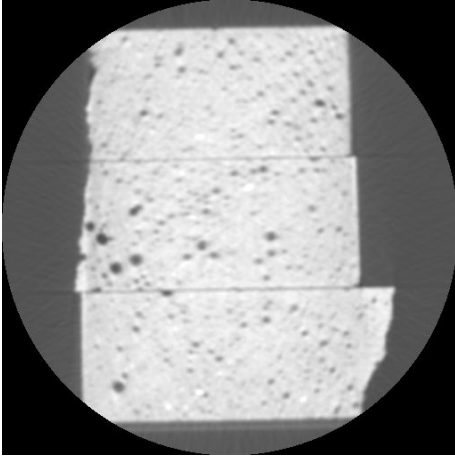
EK-2. (Devam) BT Kalibrasyon Görüntüleri



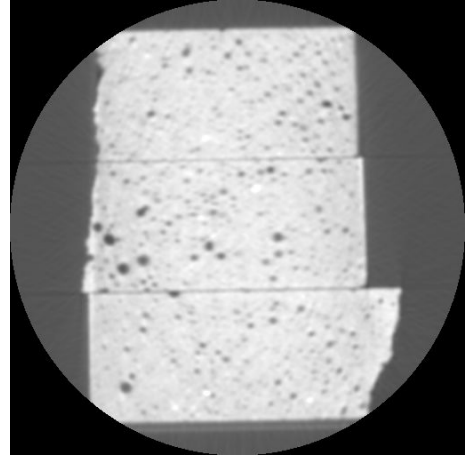
140 keV 200 mA 1,25 mm Axial tarama



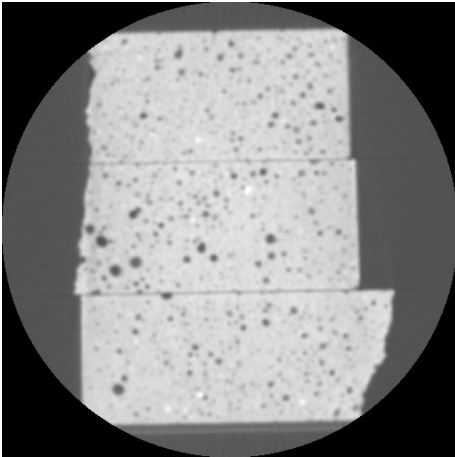
140 keV 400 mA 1,25 mm Axial tarama



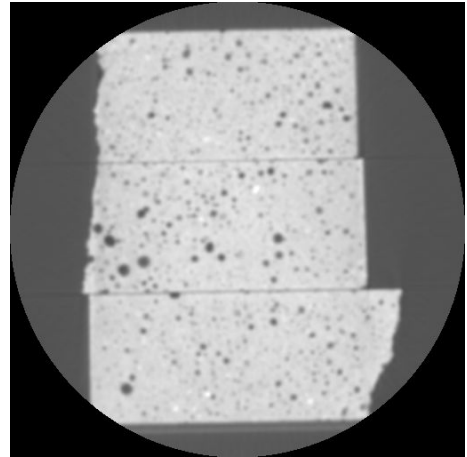
80 keV 200 mA 1,25 mm Helikal tarama



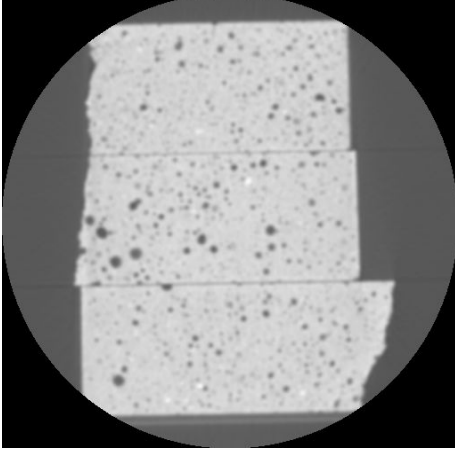
80 keV 400 mA 1,25 mm Helikal tarama



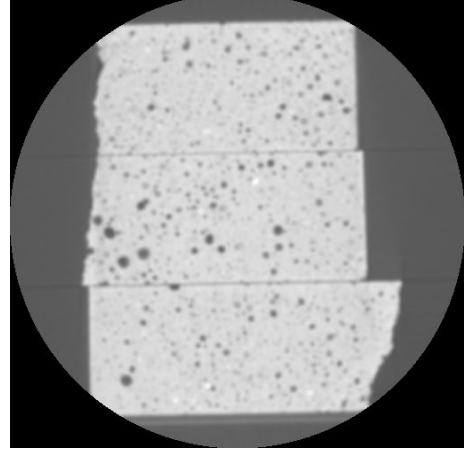
100 keV 200 mA 1,25 mm Helikal tarama

100 keV 400 mA 1,25 mm Helikal
tarama

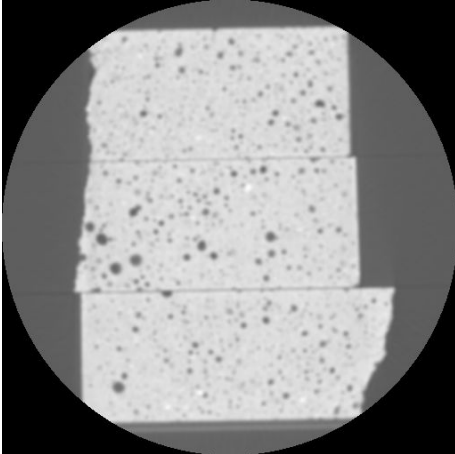
EK-2. (Devam) BT Kalibrasyon Görüntüleri



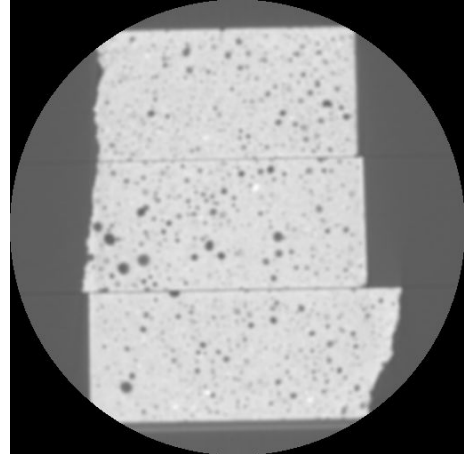
120 keV 200 mA 1,25 mm Helikal mode



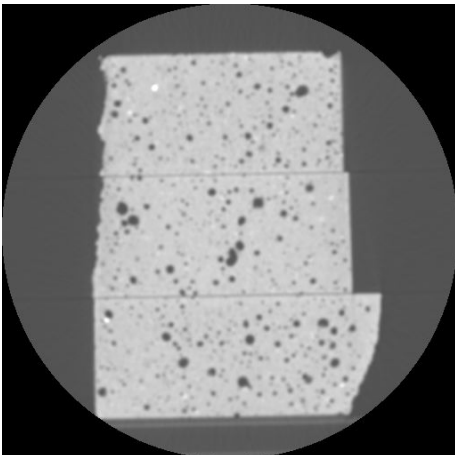
120 keV 400 mA 1,25 mm Helikal mode



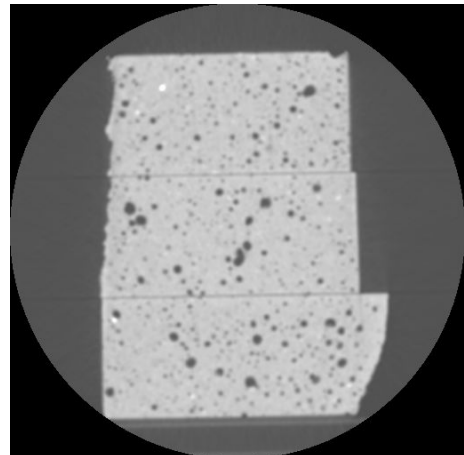
140 keV 200 mA 1,25 mm Helikal mode



140 keV 400 mA 1,25 mm Helikal mode

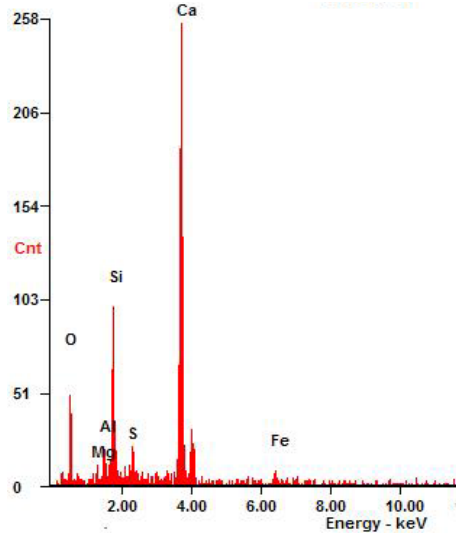


120 keV 400 mA 0,625 mm Axial mode

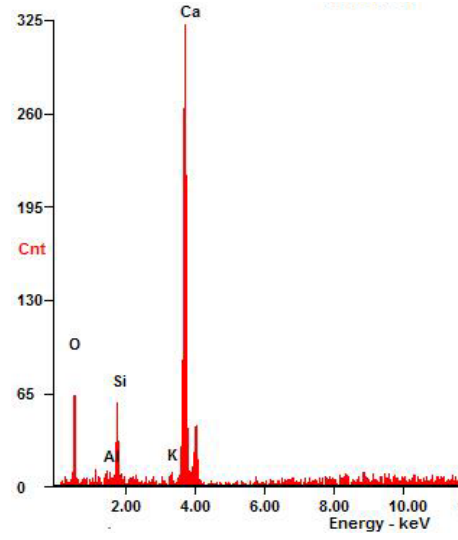


120 keV 400mA 0,625mm Helikal mode

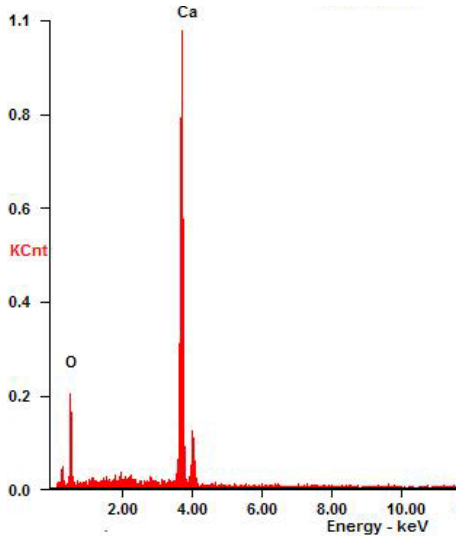
EK-3. SEM Görüntülerinde Noktasal EDS Analiz Diyagramları



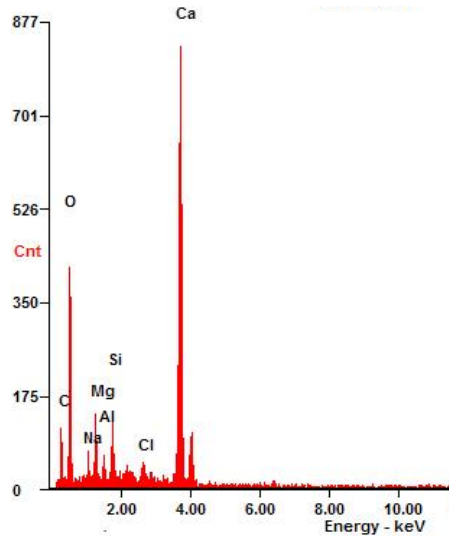
PST 28 harç numunesi



SST 28 harç numunesi

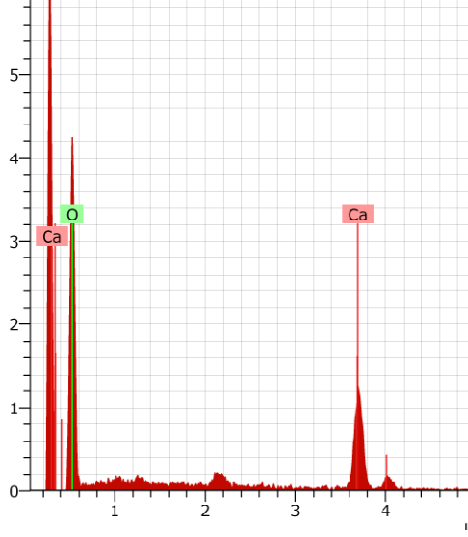


PST 70 harç numunesi

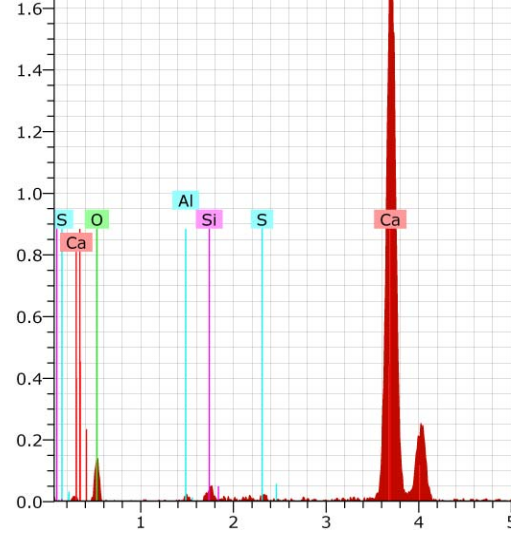


SST 70 harç numunesi

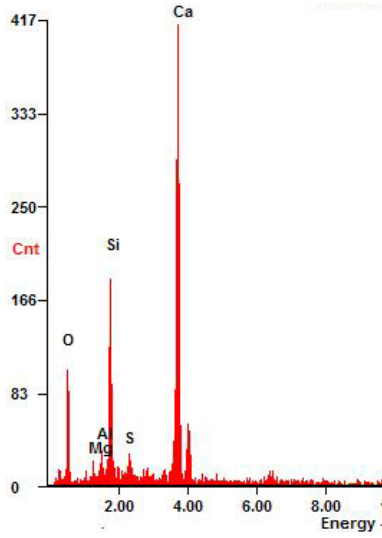
EK-3. (Devam) SEM Görüntülerinde Noktasal EDS Analiz Diyagramları



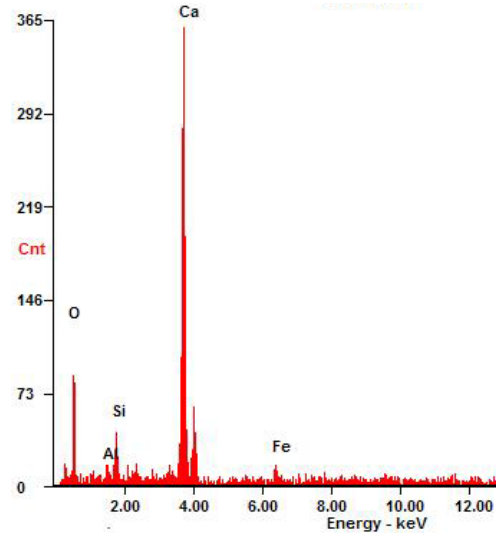
PST 180 harç numunesi



SST 180 harç numunesi

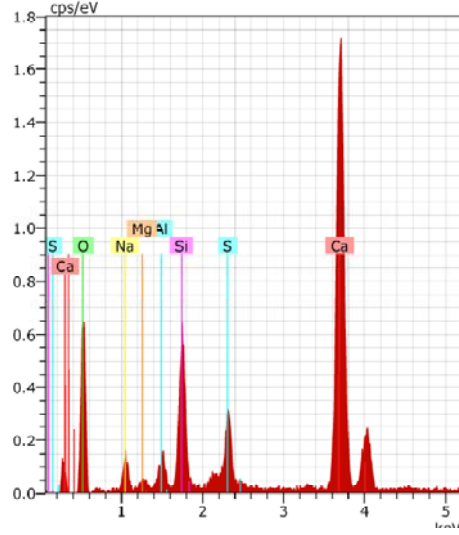


PNT 28 harç numunesi

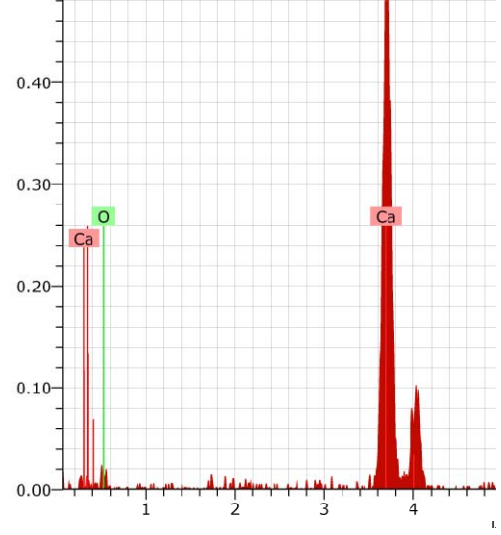


PNT 70 harç numunesi

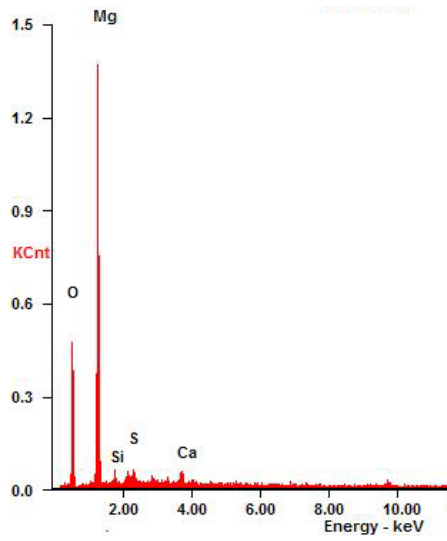
EK-3. (Devam) SEM Görüntülerinde Noktasal EDS Analiz Diyagramları



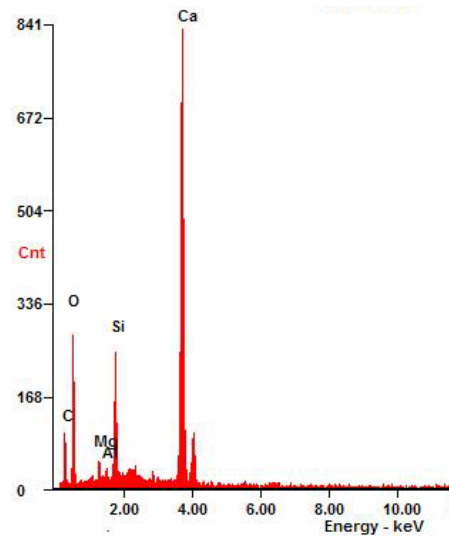
PNT 180 harç numunesi



SNT 180 harç numunesi

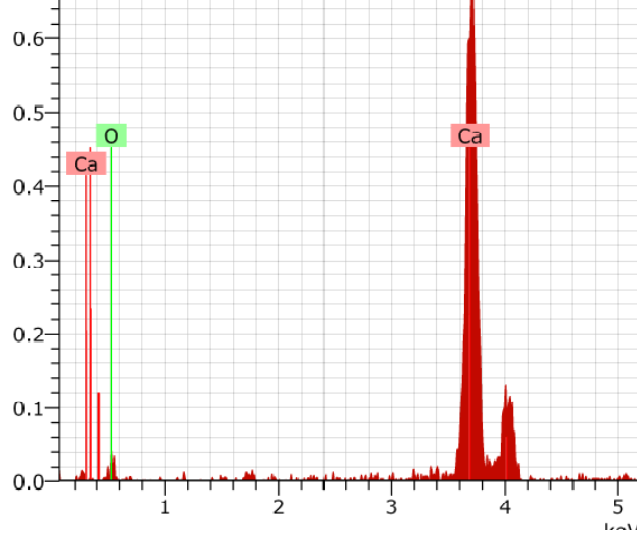


SMT 28 harç numunesi



PMT 70 harç numunesi

EK-3. (Devam) SEM Görüntülerinde Noktasal EDS Analiz Diyagramları



PMT 180 harç numunesi

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TEKİN, İlker
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 02.03.1976 Erzurum
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (252) 572 36 05
 Faks : 0 (252) 572 33 46
 e-mail : ilkertekin@yahoo.com

Eğitim

<u>Derece</u>	<u>Eğitim Birimi</u>	<u>Mezuniyet tarihi</u>
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Yapı Eğitimi	2005
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Yapı Eğitimi	2002
Önlisans	Hacettepe Üniversitesi	1996
Lise	Ankara Bahçelievler Deneme Lisesi	1993

İş Deneyimi

<u>Yıl</u>	<u>Yer</u>	<u>Görev</u>
1998 – 1999	Uluslar arası Birleşmiş Müşavirlik (UBM) A.Ş.	Sürveyan
1999 – 2001	Philips Fe-Ba Ltd. Şti.	Satış uzmanlığı
2001 – 2005	Altan&Tuncer Ltd. Şti.	Proje – Müşavirlik
2005 - ...	Muğla Üniversitesi Yatağan Meslek Yüksekokulu	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Verdiği Mesleki Dersler	Eğitim Öğretim Dönemi
Malzeme Bilimi ve Yapı Malzemesi	2006 – 2010
Yapı Teknolojisi	2006 – 2010
Karayolu İnşaatı	2006 – 2010

Mukavemet	2006 – 2009
Çelik Yapılar	2006 – 2010
Betonarme	2006 – 2009
Ahşap Yapılar	2006 – 2010
Kagir Yapılar	2006 – 2010
Bilgisayar Destekli Tasarım	2006 – 2010
Sistem analizi ve tasarımı	2006 – 2010
Beton Teknolojisi	2007 – 2010
Yapı Tesisatı	2006 – 2010
Bilgisayar	2006 – 2008, 2009 – 2010
Prefabrik Yapılar	2006 – 2008
Yapılarda Hasar Tespiti	2008 – 2009

Yayınlar

SCI, SCI-EXP., SSCI, AHCI tarafından taranan bilimsel dergilerde yapılan yayınlar

1. Aruntaş, H.Y., Tekin İ., Birgül, R., “Determining Hounsfield Unit values of mortar constituents by computerized tomography”, **Measurement**, Yıl:2010, Sayı:43, sayfa:410
2. Aruntaş H.Y., Gürü M., Dayı M., Tekin İ., “Utilization of Waste Marble Dust as an Additive in Cement Production”, **Materials and Design**, Yıl:2010, Sayı:31, Sayfa:4039

Ulusal ve uluslar arası sempozyumlar ve kongrelerde yayınlanan makaleler

3. Subaşı, S., Özgan, E., Uzunoğlu, M. M., Çullu, M., Tekin, İ., "Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Çelik ve Polipropilen Lif Kullanımının Akışkanlık Parametreleri ve Basınç Dayanımına Etkisi", **Beton 2008 Uluslararası Hazır Beton Kongresi Bildirileri**, İstanbul, 331-344 (2008).
4. Çullu, M., Bolat, H., Subaşı, S., Tekin, İ., "Yatağan ve Soma Termik Santralleri Uçucu Küllerinin Çimento Genleşmesine ve Mekanik Özelliklerine Etkisi", **Beton 2008 Uluslararası Hazır Beton Kongresi Bildirileri**, İstanbul, 428-437 (2008).
5. Bolat, H., Çullu, M., Tekin, İ., "Bir Saha Beton Uygulaması: Vakumlu Beton", **Beton 2008 Uluslararası Hazır Beton Kongresi Bildirileri**, İstanbul, (2008).

6. Aruntaş H.Y., Dayı M., Tekin İ., Birgül R., Şimşek O., Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Atık Mermer Tozunun Etkisi, **2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi**, sf: 173-180, 12-13 Nisan 2007

Diğer indeksler tarafından taranan dergilerde yapılan yayınlar

7. Tekin, İ., Birgül, R., Aruntaş, H.Y., “Determination of Void Development in Cement Mortar by Computerized Tomography”, **Çimento ve Beton Dünyası**, Yıl:2010, Sayı:13, Sayfa No:67

Ulusal hakemli ve diğer bilimsel, sanatsal dergilerde yapılan yayınlar

8. Dorum A., Tekin İ., "Uçucu kül ikameli çimento harcının basınç dayanımı ve priz zamanına distile su etkisinin araştırılması", **Politeknik Dergisi**, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, 7, 3, (2004)
9. Tekin, İ., Aruntaş, H.Y., “Çimentolu Sistemlerde Bilgisayarlı Tomografi Kullanımı”, **Yapı Dünyası**, Yıl:2009, Sayı:162, Sayfa No:50
10. İlker TEKİN, “Sanayi yapılarında yalıtımın önemi”, **İzolasyon Dünyası**, Yıl: 2009, Sayı: 79, sayfa no:18

Ödül-Proje-Buluş-Burs

Ödül

1. Bilimsel yayınları teşvik ödülü – Muğla Üniversitesi Sıtkı Koçman Vakfı – 2009
2. Bilimsel yayınları teşvik ödülü – TÜBİTAK ULAKBİM– 2009

Proje

Tübitak 1002 Hızlı Destek Programı

Konu: Sülfat Etkisine Maruz Farklı Çimento Harçlarındaki Gözenek Yapısı Gelişiminin Bilgisayarlı Tomografi Yöntemi İle İncelenmesi

İnceleme Grubu: Mühendislik araştırma grubu

Burs

Türkiye Çimento Müstahsiller Birliği - TÇMB İz Bırakanlar Bursu

Tübitak Proje - MAG 107M627

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri