



**T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**PC 42,5 ve PKÇ 32,5 ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN HARÇLARIN
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ**

LEMAN ŞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANTAKYA

EKİM-2005

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ.....	III
TABLOLAR DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
RESİMLER DİZİNİ.....	VI
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
2.1. Portland Çimentosu.....	8
2.2. Portland ve Katkılı Çimentolarda Özellikler.....	14
2.2.1. Çimentolarda Fiziksel Özellikler.....	14
2.2.2. Çimentolarda Kimyasal Özellikler.....	15
2.3. Standartlarda Sınır Getirilen Çimento Özellikleri.....	19
2.4. Puzolanlar.....	23
2.4.1. Puzolanların Tanımı ve Çeşitleri.....	23
2.4.2. Doğal Puzolanların Puzolanik Aktivitesi.....	26
2.4.3. Puzolanik Aktivite Ölçümü İçin Önerilen Yöntemler.....	27
2.4.4. Doğal Puzolanların Puzolanik Aktivitesini Etkileyen Etmenler.....	28
2.4.5. Puzolanik Katkıların Etkileri.....	29
2.5. Çimentonun Tiplerine Göre Kullanılacakları Yerler.....	32
2.6. Çimentonun Kalite Kontrolünde Faktörler.....	33
2.6.1. Kireç Doygunluk Faktörü (LSF).....	33
2.6.2. Silikat Modülü (SM).....	34
2.6.3. Alümin Modülü (AM).....	34
2.6.4. Hidrolik Modülü (HM).....	35
2.6.5. Çimentonun Hidratasyonu.....	35
2.6.6. Portland Çimentosunun Sertleşmesi.....	37
2.6.7. Hidratasyon Isısı.....	37
2.6.8. Dayanım.....	38
2.6.9. Klinker Bileşimi ve Etkisi.....	38

2.6.10. Alçıtaşı Bileşimi ve Etkisi.....	39
2.6.11. İncelik (Blaine İnceliği).....	39
2.6.12. Kızdırma Kaybı.....	40
2.6.13. Çimentoların Genleşmesine Neden Olan Reaksiyonlar.....	40
2.6.14. Sülfat Direnci.....	41
2.6.15. Daha Az Önemli Olan Bileşenler.....	41
2.7. Çimentolarda Sülfat Etkisi.....	42
2.7.1. Magnezyum Sülfatın Çimentolarda Etkileri.....	44
2.7.2. Sodyum Sülfatın Çimentolarda Etkileri.....	45
2.8. PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 Çimentolarla Yapılan Harçların Fiziksel ve Kimyasal Olarak İncelemeleri	46
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	47
3.1. Yöntem.....	47
3.2. DeneYlerde Kullanılan Malzemeler.....	47
3.2.1. Çimentolar.....	47
3.2.2. Standart Kum.....	48
3.2.3. Sülfatlar ve Çözeltiler.....	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	50
4.1. Basınç Dayanım Analizleri.....	50
4.2. Kimyasal Analizler.....	54
4.3. Mineralojik ve Mikroskopik Analizler.....	56
4.4. Uygulama Sonuçları ve Tartışma.....	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	68
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	71

ÖZET

PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN HARÇLARIN DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

Bu tez kapsamı içerisinde, PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 çimentolarla üretilen standart kumlu harçların farklı kimyasal yapılarıdaki çözeltiler içinde zamana bağlı değişimleri incelenmiştir.

Söz konusu harçlar 4x4x16 cm.lik prizmatik numunelerle hazırlanmış olup; sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltilerinde 14 ve 28 gün süreyle bekletilmişlerdir. Deneysel çalışmalarda numuneler kontrol-su ortamı ile %5 ve %10'luk sodyum sülfatlı, %5 ve %10'luk magnezyum sülfatlı ortamlarda bekletilmiştir. Sülfatlı çözeltilerde bekletilen numuneler üzerinden elde edilen değerlerin su ortamlarında bekletilen kontrol numunelerle karşılaştırılması yapılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde su ve değişik konsantrasyonlardaki sülfat ortamlarında bekletilen PÇ 42,5 harç numunelerinin PKÇ 32,5 harç numunelerine göre basınç dayanımları; MgSO_4 'lü ortamda bekleyen numunelerde Na_2SO_4 'lü ortamda bekletilene göre daha düşük çıkmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre magnezyum sülfatın sodyum sülfata oranla zararlı etkisinin daha fazla olduğu ve dayanımının daha düşük çıktığı saptanmıştır. Bu husus PKÇ 32,5'li harç numuneleri için de geçerlidir.

2005, 71 sayfa

Anahtar Kelimeler: Harç, puzolan, basınç dayanımı, sülfat direnci, portland çimento, katkılı çimento, magnezyum sülfat, sodyum sülfat

II

ABSTRACT

THE DURABILITY PROPERTIES OF MORTARS PRODUCED BY PÇ 42,5 AND PKÇ 32,5 CEMENTS

In this thesis, the time dependent variations of standard sand mortars produced by Ordinary Portland Cement (PÇ 42,5) and Mineral Additive Cement (PKÇ 32,5) in the different chemical solutions have been analyzed.

The mortars in question are prepared in the form of 4x4x16 prismatic specimens. They have been kept in solutions of sodium sulphate (Na_2SO_4) and magnesium sulphate (MgSO_4) for a period of 14 and 28 days. In the experimental studies, the specimens have been kept in control-water with %5 and %10 sodium and magnesium sulphate solutions. The data obtained from the specimens kept in the sulphate solutions is compared with control specimens kept in water.

When the obtained results are analyzed, the compressive strenght of the PÇ 42,5 mortar specimens kept in the solutions of the MgSO_4 and Na_2SO_4 are found to be lower than that of PKÇ 32,5 mortar specimens kept in the same solutions. It is also observed from the experimental study that the compressive strenght of PKÇ 32,5 is always found to be less than that of PÇ 42,5. Based on the experimental results the effects of MgSO_4 on the compressive strength of the mortar specimens are found to be more harmful than those of the Na_2SO_4 . The same conclusion can also be made for PKÇ 32,5 cement mortars.

2005, 71 pages

Key Words: Mortar, pozzolan, compressive strenght, sulphate resistance, portland cement, mineral additive cement, magnesium sulphate, sodium sulphate

III

ÖNSÖZ

Günümüzde en yaygın yapı malzemesi olarak kullanılan beton; çimento, agrega, mineral ve kimyasal katkı maddeleri ve karışım suyundan oluşan kompleks bir yapıya sahiptir. Yalın betonun yapısal özellikleri esas olarak çimento ve su ve bununla birlikte diğer karışım malzemeleri arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlara bağlıdır. Sülfatlı ortamlar beton ve betonarme yapıların durabilitesini olumsuz yönde etkileyen en önemli dış etkenlerden biridir. Bu konu ile ilgili pek çok araştırma yapılmıştır ve tartışmalar halen devam etmektedir.

Bu çalışmada, katkılı ve katkısız çimentolar kullanılarak üretilen harçların belli oranlarda sülfat içeren ortamlarda bekletilerek dayanım özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Üretilen harçlarda farklı konsantrasyonlardaki magnezyum sülfat ve sodyum sülfat tuzlarının mukavemet değerlerine etkisi belirlenmiş ve standartlardaki sınır değerlerle karşılaştırma yapılmıştır.

Tez konumun belirlenmesinde ve çalışmalarımın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, değerli fikir ve katkılarıyla ışık tutan ve yönlendiren tez danışmanım M.K.Ü İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Sabit OYMAEL'e, araştırmayı destekleyen Mustafa Kemal Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Komisyon Başkanlığı ile Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Başkanlığına, analizlerin bir kısmının yapılmasında yardımlarını esirgemeyen OYSA İskenderun Çimento Fabrikası Üretim Mühendisi Sayın Mustafa ERDEMİR'e, laboratuvar çalışmalarım esnasında yardımlarını gördüğüm Sayın Yaşar DÖNMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

IV

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Genel Çimentoların Bileşimleri (kütlece % olarak).....	13
Tablo 2.2. Çimentolarda mekanik ve fiziksel özellikler için karakteristik değerler.....	14
Tablo 2.3. Çimentolarda kimyasal özellikler için karakteristik değerler.....	16
Tablo 2.4. Portland çimentosunun ana bileşikleri.....	16
Tablo 2.5. Portland Çimentosu Bileşiklerinin Örneksele Bileşimleri.....	17
Tablo 3.1. Portland çimentolarının analizleri.....	48
Tablo 4.1. 40x40x160 mm.lik numunelerin basınç dayanım değerleri.....	50
Tablo 4.2. PKÇ 32,5 çimentosunun çözelti süreleri sonucu kimyasal analizleri.....	54
Tablo 4.3. PÇ 42,5 çimentosunun çözelti süreleri sonucu kimyasal analizleri.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ**Sayfa**

Şekil 2.1. Saf çimento hamurunun, olgunlaşma (sertleşme) süresine bağlı olarak basınç dayanımındaki artış.....	18
Şekil 2.2. Çimento ve mineral katkı.....	30
Şekil 2.3. Çimento hamur yapıları.....	31
Şekil 3.1. Standart kumun granülometrik eğrisi.....	49
Şekil 4.1. %5'lik $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 ortamlarında basınç dayanımları.....	51
Şekil 4.2. %10'luk $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 ortamlarında basınç dayanımları.....	51
Şekil 4.3. PKÇ 32,5 çimentosunun %5'lik $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 ortamlarında basınç dayanım değişmesi.....	52
Şekil 4.4. PKÇ 32,5 çimentosunun %10'luk $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 ortamlarında basınç dayanım değişmesi.....	52
Şekil 4.5. PÇ 42,5 çimentosunun %5'lik $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 ortamlarında basınç dayanım değişmesi.....	53
Şekil 4.6. PÇ 42,5 çimentosunun %10'luk $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 ortamlarında basınç dayanım değişmesi.....	53
Şekil 4.7. PÇ 42,5 çimentosunun Kontrol (su) ortamındaki X-Ray difraksiyonu.....	57
Şekil 4.8. PÇ 42,5 çimentosunun $MgSO_4$ ortamındaki X-Ray difraksiyonu.....	57
Şekil 4.9. PÇ 42,5 çimentosunun Na_2SO_4 ortamındaki X-Ray difraksiyonu.....	58
Şekil 4.10. PKÇ 32,5 çimentosunun kontrol (su) ortamındaki X-Ray difraksiyonu.....	58
Şekil 4.11. PKÇ 32,5 çimentosunun $MgSO_4$ ortamındaki X-Ray difraksiyonu.....	59
Şekil 4.12. PKÇ 32,5 çimentosunun Na_2SO_4 ortamındaki X-Ray difraksiyonu.....	59

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 4.1. PÇ 42.5-Kontrol numunesinin genel görünümü.....	61
Resim 4.2. PÇ 42.5-Kontrol numunesinin mikro yapısı.....	61
Resim 4.3. PÇ 42.5-MgSO ₄ numunesinin genel görünümü.....	62
Resim 4.4. PÇ 42.5 MgSO ₄ numunesinin mikro yapısı.....	62
Resim 4.5. PÇ 42.5-Na ₂ SO ₄ numunesinin genel görünümü.....	63
Resim 4.6. PÇ 42.5-Na ₂ SO ₄ numunesinin mikro yapısı.....	63
Resim 4.7. PKÇ 32.5-Kontrol numunesinin genel görünümü.....	64
Resim 4.8. PKÇ 32.5-Kontrol numunesinin mikro yapısı.....	64
Resim 4.9. PKÇ 32.5-MgSO ₄ numunesinin genel görünümü.....	65
Resim 4.10. PKÇ 32.5-MgSO ₄ numunesinin mikro yapısı.....	65
Resim 4.11. PKÇ 32.5-Na ₂ SO ₄ numunesinin genel görünümü.....	66
Resim 4.12. PKÇ 32.5-Na ₂ SO ₄ numunesinin mikro yapısı.....	66

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ.....	III
TABLolar DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
RESİMLER DİZİNİ.....	VI
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
2.1. Portland Çimentosu.....	8
2.2. Portland ve Katkılı Çimentolarda Özellikler.....	14
2.2.1. Çimentolarda Fiziksel Özellikler.....	14
2.2.2.Çimentolarda Kimyasal Özellikler.....	15
2.3. Standartlarda Sınır Getirilen Çimento Özellikleri.....	19
2.4. Puzolanlar.....	23
2.4.1. Puzolanların Tanımı ve Çeşitleri.....	23
2.4.2.Doğal Puzolanların Puzolanik Aktivitesi.....	26
2.4.3. Puzolanik Aktivite Ölçümü İçin Önerilen Yöntemler.....	27
2.4.4. Doğal Puzolanların Puzolanik Aktivitesini Etkileyen Etmenler.....	28
2.4.5. Puzolanik Katkıların Etkileri.....	29
2.5. Çimentonun Tiplerine Göre Kullanılacakları Yerler.....	32
2.6. Çimentonun Kalite Kontrolünde Faktörler.....	33
2.6.1. Kireç Doygunluk Faktörü (LSF).....	33
2.6.2. Silikat Modülü (SM).....	34
2.6.3. Alümin Modülü (AM).....	34
2.6.4. Hidrolik Modülü (HM).....	35
2.6.5. Çimentonun Hidratasyonu.....	35
2.6.6. Portland Çimentosunun Sertleşmesi.....	37
2.6.7. Hidratasyon Isısı.....	37
2.6.8. Dayanım.....	38
2.6.9. Klinker Bileşimi ve Etkisi.....	38

2.6.10. Alçıtaşı Bileşimi ve Etkisi.....	39
2.6.11. İncelik (Blaine İnceliği).....	39
2.6.12. Kızdırma Kaybı.....	40
2.6.13. Çimentoların Genleşmesine Neden Olan Reaksiyonlar.....	40
2.6.14. Sülfat Direnci.....	41
2.6.15. Daha Az Önemli Olan Bileşenler.....	41
2.7. Çimentolarda Sülfat Etkisi.....	42
2.7.1. Magnezyum Sülfatın Çimentolarda Etkileri.....	44
2.7.2. Sodyum Sülfatın Çimentolarda Etkileri.....	45
2.8. PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 Çimentolarla Yapılan Harçların Fiziksel ve Kimyasal Olarak İncelemeleri	46
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	47
3.1. Yöntem.....	47
3.2. Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	47
3.2.1. Çimentolar.....	47
3.2.2. Standart Kum.....	48
3.2.3. Sülfatlar ve Çözeltiler.....	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	50
4.1. Basınç Dayanım Analizleri.....	50
4.2. Kimyasal Analizler.....	54
4.3. Mineralojik ve Mikroskobik Analizler.....	56
4.4. Uygulama Sonuçları ve Tartışma.....	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	68
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	71

1. GİRİŞ

Değişik türdeki yapılarda kullanılmakta olan beton, hizmet süresi boyunca, bünyesinde yıpranmaya yol açabilecek birçok kimyasal ve fiziksel etkenle karşılaşmaktadır. Bu etkenler, doğa koşullarından, betonun kullanıldığı ortamdan betondaki alkalilerle reaktif agregalar arasındaki reaksiyonlardan kaynaklanabilmektedir.

Betonun içerisine sızan su, karbondioksit, oksijen, sülfat, asit ve klor gibi maddeler, betonda değişik türlerdeki kimyasal olayların yer almasına neden olmaktadır. İslanma-kuruma, donma-çözülme, ısınma-soğuma, aşınma ve karbonatlaşma gibi olaylar betonun yıpranmasına yol açacak nitelikteki fiziksel olaylardır.

Betonda yer alan kimyasal ve fiziksel olaylar sonucunda, beton daha boşluklu bir malzeme durumuna gelebilmekte, içerisindeki demir donatılar paslanabilmekte, beton aşınabilmekte ve betonun içerisinde çok büyük gerilmeler oluşabilmektedir. Bütün bu olaylar, betonun hasar görmesine, hizmet edemez duruma gelmesine yol açmaktadır.

Betonun dayanıklılığını olumsuz olarak etkileyen bazı önemli kimyasal ve fiziksel olaylar; betondaki kalsiyum hidroksitin çözünmesi, beton yüzeyinde çiçeklenme oluşması, sülfat etkisi, deniz suyunun etkisi, asit etkisi, karbonatlaşma, alkali-agrega reaksiyonu, betonun içerisine yerleştirilen çelik donatının korozyonu, donma-çözülme etkisi, beton yüzeyinin pullanması ve aşınmadır. Betondaki kalsiyum hidroksitin çözünmesi beton yüzeyinde çiçeklenme oluşmasına neden olur. Betonun içerisine giren sular değişik miktarlarda yabancı madde içerdiklerinden dolayı değişik türdeki suların betondaki sertleşmiş çimento hamurunun yapısındaki kalsiyum hidroksitin ve tuzların erimesi farklı etkilere de neden olmaktadır. Bu etki boşluk meydana gelmesidir. Burada betona sızan suyun sertliği ve suyun sıcaklığı çözünmeye etkili olmaktadır.

Betonun içerisindeki kalsiyum hidroksitin ve tuzların çözünmesi ve betonun yüzeyine çıkması sonucunda beton yüzeyinde ince bir beyaz tabaka oluşturmasına çiçeklenme denilmektedir. Nemli ortamın çiçeklenme olayına etkisi büyüktür.

Sülfatların betona olumsuz etkileri vardır. Sertleşmiş beton içerisine dışarıdan sızan sularla birlikte giren sülfatlar, betonun genişip çatlamasına yol açan kimyasal olayların gelişmesine neden olmaktadır. Sülfat hücumuna maruz kalan betonların yüzeyi beyazımsı bir görünüm almaktadır. Deniz suyu dolayısıyla klorürlü ortam betonda olumsuz etki yapar. Deniz sularının beton yapılara esas zararı, bu tür sularda

bulunan klordan kaynaklanmaktadır. Deniz suyundaki klor, betonun içerisindeki demir donatıların korozyonunu hızlandırmakta betonun parçalanmasına yol açmaktadır.

Asit hücumu sonucunda, sertleşmiş betonun içerisindeki kalsiyum hidroksit ve kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jellerindeki çözünme beton yüzeyinde yumuşak (çamur gibi) ince bir tabaka oluşturmaktadır. Beton daha gözenekli duruma gelerek dayanımı ve dayanıklılığı daha az olmaktadır (ERDOĞAN, 2003).

Gerek sülfatlar ve gerekse asitlerin etkisi altında gözenekli bir yapıya dönüşen çimento pastaları geçirgenlik bakımından olumsuz ortam oluşturur. Zira geçirgenlik sıvıların yapı içinde tutulmasının çokluğu ve zarar verme miktarı ile ilişkilidir. Nitekim çimento kısmi %28'lik bir boşluğa sahip, geçirgenliği 7×10^{-16} m/sn mertebesindedir (NEVİLLE, 1977).

Karbonatlaşma; betonun içerisine giren karbondioksitin, betonun içerisinde bulunan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşur. Bu olayın betona olumlu ve olumsuz etkileri vardır. Olumsuz etkileri; sertleşmiş çimento hamuru büzülme dolayısıyla betonda çatlaklar oluşmaktadır. Kalsiyum hidroksitin çözünmesi ile alkalın ortam daha düşük düzeye inmekte, alkalitenin azalması ile karbonatlaşmanın yer aldığı bölgelerdeki betonarme demirlerinin korozyonu daha hızlı olabilmektedir. Karbonasyonun olumlu etkileri ise; beton dayanımında çok az bir artış meydana gelmesidir. Karbonatlaşma sonucu oluşan CaCO_3 kristalleri, çimento hamurundaki kapiler boşlukların içerisine yerleştikleri için beton nispeten daha geçirimsiz olabilmektedir (OYMAEL, 2003).

Sertleşmiş betonun içerisindeki alkalilerle reaktif silika içeren agregalar arasında bir reaksiyon oluşur. Bu reaksiyon sonucunda kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) ve potasyum-silika-hidrat (K-S-H) gibi alkali silika jelleri oluşmaktadır. Bu jellerin çok büyük miktarda su emebilme özelliği bulunmaktadır. Bünyelerine çok büyük miktarda su alarak oluşmuş olmaları sonucunda, sertleşmiş betonun içerisinde çok büyük genleşmeler yer alabilmektedir. Alkali-silika reaksiyonunun devam etmesiyle, beton yüzeyinde parçalanmalar ve kopmalar meydana gelmektedir.

Beton ortamında yer alan ve korozyonu etkileyen faktörler vardır. Betonun içerisindeki çelik çubuğun korozyon göstermemesi veya düşük hızda korozyon gösterebilmesi için; geçirimsiz beton üretilmesi, beton yüzeyinin su-itici kimyasal maddelerle veya uygun bir malzeme tabakasıyla kaplanması, beton üretiminde korozyon

engelleyici katkı maddelerinin kullanılması, çelik donatıların yüzeylerinin epoksi veya uygun bir madde ile korunması, çelik çubukların üzerindeki beton örtüsünün (pas payının) yeterli kalınlıkta olması, katodik koruma uygulanması gibi önlemlere başvurulur.

Beton harçlarda donma-çözülme diye fiziksel bir olay vardır. Islanarak doygun duruma gelen ve donma-çözülme devirlerine maruz kalan bütün betonlar kısa sürede hasar görmektedirler. Parklarda, hava alanlarında, kaldırımlarda, yollarda kullanılan betonlar bu tür hasara maruz kalabilecektir. İç gerilmeler nedeniyle beton yüzeyindeki agregalar gevşeyip kopmakta, betonun içerisinde çatlaklar oluşmaktadır. İstenilen nitelikleri taşımayan betonlarla yapılan yapı elemanlarının yüzeylerinin ince tabakalar halinde gevşeyip kopma göstermesine pullanma denilmektedir. Beton yüzeyine serilen tuzlar, yüzeyde pullanma yarattığı gibi ayrıca betonun içerisindeki demirin korozyonunu da artırmaktadır.

Beton ve harçlarda aşınma olayı vardır. Bu yavaş tempoda yer alan fiziksel ve mekanik bir olaydır. Beton yüzeyinin aşınmaya dayanıklı olabilmesi için yapılması gerekenler şunlardır:

1. Betonun basınç dayanımı yüksek tutulmalıdır.
2. Agregalar aşınmaya karşı yeterince dayanıklı seçilmelidir.
3. Taze betondaki terlemenin ve plastik rötre çatlakların minimum düzeyde yer almasına dikkat edilmelidir.
4. Taze betonun yüzeyinin düzeltilmesi uygun tarzda yapılmış olmalıdır.
5. Beton yüzeyinde gerekirse yüzey sertleştirici maddeler kullanılmalı veya betonun üst bölümünde daha sert bir beton tabakası oluşturulmalıdır.

(ERDOĞAN, 2003).

Çalışmanın Amacı:

Bu çalışmada, farklı kimyasal yapılarıdaki çözelti ortamlarında bekletilen çimento harçlarının basınç değişimi ile fiziksel ve kimyasal değişiminin araştırılması söz konusudur. Elde edilen sonuçlara dayanarak çimento harcı numunelerinin direncinde azalma olup olmadığı, sülfat çözeltisi içinde bekletilen numunelerdeki değişimler deneysel olarak belirlenmiştir.

Yöntem:

Bu çalışma literatür taraması ve deneysel çalışmalardan oluşmaktadır. Deneyslerde standart kumlu çimentolu harçlar hazırlanarak, harçların farklı kimyasal yapılarıdaki çözeltiler içinde farklı zamanlarda tutularak değişimleri incelenmiştir. Söz konusu numunelerin 4x4x16 cm olması ve çözeltilerin; sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve magnezyum sülfatlı (MgSO_4) olması öngörülmüştür. Deneysel çalışmalarda numuneler %0, %5 ve %10'luk sodyum sülfat; %0, %5 ve %10'luk magnezyum sülfatlı ortamlarda bekletilerek denenmiştir. Hangi likit ortam olursa olsun numuneler üzerinden elde edilecek değerlerin %0 (su) ortamlarında bekletilen kontrol numunelerle karşılaştırılması yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kılınç ve Uyan; beton karışım suyundaki sülfat tuzlarının çimento harcı özelliklerine etkisi konulu çalışmalarında, karışım suyu olarak kullanılan $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltilerinin çimento harcı özelliklerinden eğilme ve basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada; magnezyum sülfatın hem eğilme hem de basınç mukavemeti için zararlı etkisi ortaya çıkmıştır. Sodyum sülfatın magnezyum sülfata oranla sülfat etkisi açısından daha zararlı olduğu elde edilmiştir. Sodyum sülfatın basınç mukavemetine zararlı etkisinin su/çimento oranına bağlı olması diğer bir ilginç bulgudur. Karışım suyundaki zararlı maddelerin olumsuz etkisinin yalnızca 7 günlük sonuçlara değil 28 ve 90 günlük sonuçlara da bakılarak belirlenmesi gerektiği çalışmadan elde edilen diğer bir sonuçtur (KILINÇ ve UYAN, 2003).

Atahan, Pekmezci, Uyan ve Yıldırım, sülfatların portland çimentolu ve sülfata dayanıklı çimentolu betonların durabilitesine etkisi konulu çalışmasında, sülfatlı ortamların üretilen betonların durabilitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Üretilen betonlar normal su ve %10 konsantrasyonlu Na_2SO_4 çözeltisi içerisinde kürlenmiştir. SDC 32,5 ve PÇ 42,5 kullanılıp, su/çimento oranları 0,65 ve 0,75 olarak seçilmiştir. Çimento dozajları 320 ve 400 kg/m^3 olmak üzere SDC ve PÇ kullanılmıştır. Çalışmada; %10'luk Na_2SO_4 çözeltisi içerisinde bekleyen betonların yaptıkları boy değişimleri irdelendiğinde, en büyük boy değişimleri PÇ ve SDC için su/çimento oranı 0,75 olan ve 400 kg/m^3 çimento miktarına sahip betonlarda görülmüştür. 19 hafta itibari ile elde edilen zaman-boy değişimi grafiklerinde PÇ ve SDC arasında belirgin bir fark görülmemiştir. %10 gibi yüksek oranda seçilen Na_2SO_4 etkisinde bile 4.haftadan 19. hafta sonuna kadar olumsuz etkinin meydana gelmemesi dış etkilere dayanıklılık açısından çimento dozajının ve su/çimento oranının önemini ortaya koymaktadır. Hasar oluşumlarının gözlenebilmesi için deneylere bir süre daha devam edilmesi gerektiğini söylemişlerdir (ATAHAN ve ark., 2003).

Biricik ve Aköz; sodyum sülfat çözeltisinin buğday sapı külü katkılı ve katkısız harçlara etkileri konulu çalışmalarında, puzolanik özelliği deneysel olarak belirlenen buğday sapı külünün, harçların sülfata karşı dayanıklılığını araştırmak için SO_4^{2-} konsantrasyonu 10000 mg/l ve 40000 mg/l olan sodyum sülfat çözeltileri kullanmışlardır. Deneyler standart harçlarda ve çimento ağırlığının %8, %16 ve %24

oranlarında ikameli olarak buğday sapı külü katılmış harçlarda yapılmıştır. Numuneler 28 gün kirece doygun suda saklanmış ve 28.gün eskitme süreci için başlangıç gösterilmiştir. Başlangıçta, 28., 56., 90. ve 180. günlerde numunelerde eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve birim ağırlık belirlenmiştir. Çözeltiler 14 gün ara ile yenilenmiş, o günlerde ağırlıklar ölçülmüştür. Sodyum sülfat çözeltilerin harç özelliklerine etkileri kül oranına göre değerlendirilmiştir. Çimentoya kül katılması, 180.güne kadar yüksek konsantrasyon da bile harcın sülfata karşı dayanıklılığına olumlu etki yapmıştır. Çalışmada; buğday sapı külü katkılı numunelerde 180. güne kadar gözle görülür yumuşama, çatlama, dökülme ve parçalanma gözlenmemiştir, her üç kül oranı için sodyum sülfat çözeltilerinin mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından 180.güne kadar olumsuz etkisi görülmemiştir. Etkin kül oranının %24 olduğu tespit edilmiştir ancak mekanik ve fiziksel deneylerden başka içyapı araştırması da yapılması gerektiğini söylemişlerdir (BİRİCİK ve AKÖZ, 2000).

Kılınçkale ve Uyan; tras çimentolu harçların dayanım ve dayanıklılığına sülfatlı çözeltilerin etkisi konulu çalışmalarında, portland çimentosuna %0, %10 ve %30 tras katarak katkılı çimentolar elde etmişlerdir. Bu çimentolarla 4x4x16 cm boyutunda harçlar üretilmiş ve harçlar üretimden sonra 28. günde su, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerinde 12 hafta bekletilmiştir. Su ve sülfat çözeltilerinde bekleyen harçların 4, 8, 12.ci kür haftalarında eğilme ve basınç dayanımları 2, 4, 6, 12. haftalarda da ağırlık değişimleri belirlenmiştir. Bu çalışma sonunda harçların basınç dayanımında en fazla zararlı olan $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ çözeltisi, en az zararlı ise MgSO_4 çözeltisi olduğunu gözlemlemişlerdir (KILINÇKALE ve UYAN, 1996).

Aköz, Yüzer ve Koral, silis dumanı katkılı ve katkısız harçlara sodyum klorür ve magnezyum klorürün etkileri konulu çalışmalarında, NaCl ve MgCl_2 çözeltilerinin normal ve %10 silis dumanı katkılı harçların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. 28. günde sudan çıkarılan 4x4x16 cm boyutlu numuneler, Cl^- konsantrasyonu 40000 mg/L olan NaCl ve MgCl_2 çözeltilerinde ve suda bekletilmişlerdir. 28. gün başlangıç (0.gün) kabul edilerek 28., 90., 180. ve 300. günlerde eğilme, basınç, birim ağırlık, hacimce su emme ve kılcal su emme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca harçlardaki serbest Cl^- miktarı kimyasal deneylerle belirlenmiştir. Bu çalışmada; silis dumanının, NaCl ve MgCl_2 'nin etkilerine karşı harcın performansını

artırdığını ve $MgCl_2$ 'nin, NaCl den daha fazla olumsuz etki yaptığını gözlemlemişlerdir (AKÖZ ve ark., 1996).

Özer, doğal puzolanlar ile üretilen betonlarda kür etkisinin incelenmesi konulu tez çalışmasında, doğal puzolan katkılı ve katkısız portland çimentosu kullanılarak üretilen betonların dayanım gelişimlerine kür koşullarının etkisini araştırmıştır. Traslı çimento, katkılı çimento, portland çimentosu kullanılarak üretilen ve yaklaşık eşit 28 günlük standart basınç dayanımına sahip olacak şekilde dizayn edilen betonlar yedi farklı kür koşuluna tabi tutulmuştur. Bu kür koşulları: sürekli suda, sürekli havada, ilk 28 gün suda, ilk 14 gün suda, ilk 7 gün suda, ilk 3 gün suda, ilk 7 gün havada olarak düzenlenmiştir. Elde edilen sonuçlar beton basınç dayanımının, her 3 tip çimento içinde artan kür süresiyle birlikte arttığını göstermiştir. Traslı çimento ile üretilen betonlar yeterli nem kürünün uygulandığı durumlarda diğer çimentolara kıyasla, daha yüksek dayanım ve daha düşük kılcallık değerleri vermişlerdir. Yeterli nem kürünün sağlanamadığı durumlarda ise portland çimentosu ile üretilen betonların daha iyi sonuçlar verdiklerini gözlemlemişlerdir (ÖZER, 2000).

Kılınç, beton karışım suyundaki magnezyum sülfat, sodyum sülfat ve sodyum sülfür tuzlarının taze ve sertleşmiş çimento harcı özelliklerine etkisi konulu çalışmasında, karışım suyunda bulunan yabancı maddelerden sodyum sülfat, magnezyum sülfat ve sodyum sülfürün taze ve sertleşmiş çimento harcının özelliklerine etkisini incelemiştir. Araştırmada çimento tipi sabit seçilmiş olup bütün deneylerde normal portland çimentosu (PÇ 42,5) kullanılmıştır. Bu amaçla; 400 kg/m^3 dozajlı ve su/çimento oranı 0.60 ve 0.75 olan 2 tür harç üretilmiştir. Sülfat tuzlarının farklı konsantrasyonlarda çözeltileri hazırlanmış ve bu çözeltiler karışım suyu olarak kullanılmıştır. Ayrıca kontrol amacı için şahit su ile harçlar üretilmiştir. Üretilen harçların işlenebilme özelliği (flow testi) sarsma tablası deneyi ile belirlenmiştir. Ayrıca taze harçların taze birim ağırlık değerleri ölçülmüş ve gerçek bileşim miktarları bulunmuştur. Öte yandan denenen kimyasal maddelerin priz sürelerine etkisini belirlemek için priz deneyleri (Vicat aleti ile) yapılmıştır. Her karışımda numunelerin 6 adedi $20 \text{ }^\circ\text{C} + 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik su içinde deney gününe kadar saklanmıştır. Daha sonra bu numuneler üzerinde (2 adedi 7 gün, 2 adedi 28 gün ve 2 adedi 90 gün) birim ağırlık, ultrases, eğilme ve basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Boy değişim deneyi için 2 adet numune $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ve %50-60 rutubetli ortamda tutularak 90.güne kadar boy değişim

ölçmeleri yapılmıştır. Sonuç olarak karışım suyundaki sülfat tuzlarının taze ve sertleşmiş çimento harcının özellikleri üzerindeki etkisini geniş olarak analiz etmişlerdir (KILINÇ, 2003).

Mehta, %10, %20 ve %30 oranlarında doğal puzolan olarak zeolit ile elde edilen katkılı portland çimentolarının normal portland çimentosuna benzer veya daha fazla basınç dayanımı gösterdiklerini, ayrıca alkali-silika reaksiyonu ve sülfat etkisine karşı çok daha dirençli olduklarını rapor etmiştir (MEHTA, P. K. (1981). Doğal zeolit katkısı içeren betonlar üzerinde yapılan çalışmalar da, zeolitın beton özelliklerini geliştirdiğini ve yüksek performanslı beton üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir (FENG, N. Q., Lİ, Z. G., ZANG, X. W., 1990). Ayrıca, doğal zeolit katkısının betonun basınç dayanımını artırdığı ve alkali-agrega reaksiyonu kaynaklı istenmeyen genleşmeleri önlediği tespit edilmiştir (FENG, N. Q., JİA, H., CHEN, E., 1998).

2.1. Portland Çimentosu

Portland çimentosu genellikle gri renkli toz halinde maddedir. Klinkerin kalsiyum sülfat ve ağırlıkça en fazla %0-5 arası mineral katkı ile öğütülmesi ile elde edilir. Çimento üretiminde önce kalker, kil ve gerekiyorsa bir miktar alüminyum ve demir oksitler istenilen kimyasal bileşimi sağlamak üzere orantılı olarak harmanlanıp öğütülürler. Farin olarak adlandırılan hammadde karışımı döner fırında 1450 °C civarında bir sıcaklığa kadar pişirilir. Fırının çıkış ucuna doğru farin taneleri önce ergiyerek ve sonra çeşitli reaksiyonlar sonucu granüle halde klinker adı verilen toprakları meydana getirirler. Soğutucudan çıkan klinker çimento üretiminde bir ara ürün sayılır. Çimento, klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat ile öğütülmesi sonucu elde edilir. Klinker kalsiyum sülfat ile doğrudan fabrikada öğütülebilir. Değerli bir madde olan klinkerin öğütme tesislerine gönderilmesi ve hatta yurt dışına ihraç edilmesi söz konusudur.

Çimentonun kimyasal reaksiyona girebilmesi için yaklaşık 2 cm çapındaki klinker tanelerinin çimento tanesi inceliğine kadar öğütülmesi gerekir. Çimento tane boyutları genellikle 40 mikronun altında, ortalama 15-20 mikron (0.0015-0.0020 cm) olduğuna göre, bu aşama sonunda klinker tanesinin 1000 kere kadar küçültülmüş olması gerekmektedir (TÇMB, 2004).

Klinkere öğütme sırasında ağırlıkça % 3-5 arası kalsiyum sülfat (alçı) katılır. Bu işlem çimentonun su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyonların ve katılma sürecinin

kontrolü bakımından zorunludur. Son zamanlarda öğütmeyi kolaylaştırıcı bazı kimyasallar da bu aşamada klinkere katılabilmektedir.

Bu şekilde elde edilen portland çimentosuna klinker ile kalsiyum sülfatın öğütülmesi sırasında veya ayrıca öğütülmüş olarak bazı mineral katkıları katılarak değişik tipli çimentoların üretilmesi de giderek yaygınlaşan bir uygulamadır (YEĞİNOBALI, 2004).

Bir çimentodaki reaksiyonların nasıl olduğu konusunda formüller/kimyasal denklemler verilmiştir. Bu reaksiyonlar sonucunda serbest kireç denilen Ca(OH)_2 'nin meydana geldiği saptanmıştır. Bu noktada bir teknik elemanın, mühendisin Ca(OH)_2 'nin meydana geldiğini bilmesi gerekir.

Ca(OH)_2 çimentoda zararlı sulara ve her türlü sulara karşı mukavemeti azaltır. Çünkü Ca(OH)_2 suda kolayca çözünür. Ca(OH)_2 'nin çözünmesi ile betonun porozitesi artar. Bu durumda da betonun içine sular daha kolaylıkla girer ve zararlı etkilerin artmasına neden olur. Boşluğun artması betonun mekanik mukavemetini azaltır. Ayrıca, çözülmüş Ca(OH)_2 'nin donatıya ulaşması sonucu donatıda korozyon riski artar (OYMAEL, 2002).

Halen yürürlükteki Türk ve Avrupa standartlarına göre çeşitli çimentoların üretimi mümkündür.

Portland çimentosunda hammadde karışım oranlarını ayarlayarak dört ana bileşenin göreceli miktarlarını ve dolayısı ile çimentonun bazı özelliklerini istenilen yönde değiştirmek mümkün olmaktadır. Örneğin, C_3A içeriğinin en fazla % 5 olacak şekilde azaltılması, C_3S içeriğinin C_2S 'inkine yakın değere indirilmesi ile "sülfatlara dayanıklı çimento" elde edilmiş olur. Çimentoda erken dayanımı arttırmak isteniyorsa C_3S miktarının ve inceliğinin artırılması yoluna gidilir.

Hammaddelerin özel olarak seçimi, beyaz kil ve bazı katkıları kullanılması ile çimentonun diğer özellikleri değiştirilmeden gri rengi beyazlaştırılmakta ve "beyaz çimento" elde edilmektedir. Çimentolara % 5'in üzerinde mineral katkı katılması sonucu elde edilen katkıli portland çimentoları katkı türleri ve miktarlarına bağlı olarak çok çeşitlidir. Evvelce değinildiği gibi mineral katkıları klinker ve alçı ile birlikte öğütülürler veya ayrıca öğütüldükten sonra çimentoya katılabilirler. Bu amaçla kullanılan katkıları arasında doğal puzolan olan tras, kalker, endüstriyel atık olan yüksek fırın cürufu ve uçucu kül sayılabilir. Son yıllarda çimentoya aynı zamanda birden fazla

mineral katkı katılabilmektedir. Yedinci beş yıllık kalkınma planı özel ihtisas komisyonu raporu cilt 1 ve cilt 2’de çeşitli puzolanlar yer almaktadır (DPT, 1996).

Mineral katkılı çimentolar daha ekonomik ve çevre dostudur. Çimento üretiminde kullanılan doğal hammaddelerden, yakıt ve elektrik enerjisinden tasarruf sağlarlar ve atık malzeme kullanımına imkân tanırırlar. İlaveten sülfatlara dayanıklılık gibi teknik avantajlara da sahip olmaları mümkündür.

Halen ülkemizde standardı bulunan çimentoların sembol ve isimleri şöyledir: (TS EN 197-1)

- PÇ** : Portland çimentosu
- KÇ** : Katkılı çimento
- EYÇ** : Erken dayanımı yüksek çimento
- CÇ** : Cürüflu çimento
- SDÇ** : Sülfatlara dayanıklı çimento
- TÇ** : Traslı çimento
- BPÇ** : Beyaz portland çimentosu
- UKÇ** : Uçucu küllü çimento
- SSÇ** : Süper sülfat çimentosu
- PCC** : Portland cürüflu çimento
- PSF** : Portland silis dumanlı çimento
- PLÇ** : Portland kalkerli çimento
- PKÇ** : Portland kompoze çimento
- PZÇ** : Puzolanik çimento
- KZÇ** : Kompoze çimento

Avrupa’da kullanılmakta olan “Genel Çimentolar” standardı 2003 yılında TS EN 197-1 olarak ülkemizde de yürürlüğe girmiş olup bu standart “Özel Amaçlı Çimentolar” kabul edilen SDÇ ve BPÇ dışında yukarıdaki tüm çimentoları veya eşdeğerlerini kapsamaktadır. Sonuç olarak, eski çimento standartlarının büyük bölümü 2004 yılı başlarından itibaren yürürlükten kalkmıştır. Bu arada KÇ, EYÇ, CÇ, TÇ, UKÇ, SSÇ sembolleri yerine yeni standarttaki benzer çimentoların sembolleri kullanılmaktadır.

Çimentolar dayanım sınıflarına göre alt gruplara ayrılır. Ayrıca çimento sembolünün yanında katkı miktarını ve erken dayanımı belirleyen harfler de bulunabilir. Çimentonun dayanımı 32.5, 42.5, 52.5 sayılarından birisi ile belirtilir. Bu sayı standart

deneyde çimento numunesinin 28 gün içinde ulaşması gereken basınç dayanımının N/mm^2 veya MPa olarak değeridir. Ayrıca bir R harfi bulunuyorsa bu çimentonun erken dayanımlı olduğunu ve 2 gün içinde standartta belirtilen dayanıma ulaşacağını gösterir. Çimento, içindeki mineral katkı miktarına göre de sınıflandırılır. Standart sınırlar içinde göreceli olarak az katkı bulunduğu A harfi ile çok katkı bulunduğu B harfi ile belirtilir.

Bazı örnekler:

PKÇ/A 32.5 R: İçinde % 6-20 arası toplam katkı bulunan, erken dayanımlı 32.5 dayanım sınıfında portland kompoze çimento.

PKÇ/B 32.5: İçinde % 21-35 arası toplam katkı bulunan 32.5 dayanım sınıfında portland kompoze çimento demektir.

TS EN 197-1 standardı genel amaçlı çimentoları (CEM çimentoları) 5 ana tip içerisinde toplamaktadır. Çimento tipleri aşağıda verilmiş olup bileşimleri Tablo 2.1.'de görülmektedir.

CEM I Portland Çimentosu

CEM II Portland Kompoze Çimento

CEM III Portland Yüksek Fırın Cürüflü Çimento

CEM IV Puzolanik Çimento

CEM V Kompoze Çimento

Çimento ana bileşenleri: Klinker ile Tablo 2.1'de belirtilen ve miktarları kütlece %5'in üzerinde olan ana bileşen katkılardır.

Çimentolarda Tip ve Ana Bileşen Sembolleri şunlardır;

A: Çimentonun en az mineral katkı içeren tipi

B: Çimentonun A tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipi

C: Çimentonun B tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipi

K: Klinker

D: Silis dumanı

Q: Doğal kalsine edilmiş puzolan

W: Kalkersi uçucu kül

L: Kalker (TOC < %0.5) (TOC: Toplam organik karbon)

S: Granüle yüksek fırın cürufu

P: Doğal puzolan

V: silissi uçucu kül

T: Pişmiş şist

LL: Kalker (TOC<%0.2)

(YEĞİNOBALI ve ERTÜN, 2004).

2.2. Portland ve Katkılı Çimentolarda Özellikler

2.2.1. Çimentolarda Fiziksel Özellikler

TS EN 197-1 çimentoları için öngörülen mekanik ve fiziksel özellikler Tablo 2.2'de "karakteristik" değerler olarak gösterilmiştir. Ayrıca 1997'den önceki çimento standartlarında yer alan tane inceliği ve priz bitiş süreleri ile ilgili sınırlamalar kalkmış bulunmaktadır. İlâveten, 32.5 ve 42.5 N/mm² dayanım sınıflarında 28 günlük dayanımlar için üst sınırlar belirtilmektedir.

Tablo 2.2. Çimentolarda mekanik ve fiziksel özellikler için karakteristik değerler (YEĞİNOBALI ve ERTÜN, 2004)

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı(MPa)		Standart Dayanım 28 günlük	Priz Başlama Süresi (dakika)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanım 2 günlük	7 günlük			
32.5 N	-	≥16.0			
32.5 R	≥10.0	-	≥32.5	≤52.5	≥75
42.5 N	≥10.0	-			
42.5 R	≥20.0	-	≥42.5	≤62.5	≥60
52.5 N	≥20.0	-			≤10
52.5 R	≥30.0	-	≥52.5	-	≥45
EN 196-1			EN 196-3		

Çimento iki bakımdan beton mukavemetinin değişmesine sebep olmaktadır. Bunlardan birincisi çimento miktarı veya çimento dozajı, yani 1 m³ betonda ağırlık cinsinden çimento miktarıdır. Betonun mukavemeti çimento miktarı ile birlikte artar. Yalnız çimento dozajının mukavemette ne miktar bir artış meydana getirdiği henüz kesin olarak saptanamamıştır. Çimento dozajı, agreganın granülometrik bileşimi ile yakından ilgilidir. Genel olarak agrega karışımında ince tanelerin miktarı fazla ise çimento dozajı büyük olmalıdır. Çünkü agregaların boyutları küçüldükçe özgül yüzeyleri artmaktadır. Çimentonun ikinci etkiye şekli cinsinin ve daha doğrusu mekanik mukavemetinin betonun mukavemetini değiştirmesine sebep olmasıdır. Mukavemeti büyük olan çimento kullanılarak üretilen betonların mukavemetinin yüksek olduğunu deneyler daima doğrulamaktadır (YILMAZ ve ark., 1985).

Yüksek mukavemetli bir çimentoda taneler çok ince öğütülmelidir. İncelik (blaine inceliği) arttıkça çimentonun beton içindeki dağılımı kolaylaşır (AKMAN, 1987).

Beton mukavemeti üzerinde en büyük tesiri su/çimento oranı yapar. Suyun gerekenden az olması, çimentonun hidratasyonu yeter miktarda su bulamamasından dolayı eksik bir şekilde gelişmesine ve ayrıca kalıbına dökülen betonda fazla miktarda boşluk kalmasına yol açacaktır. Betona konulan suyun gerekli sudan fazla olması ise, çimento hamurunun mukavemetini azaltacak, betonun sıkışmasına engel olacak ve böylelikle boşlukları artıracaktır (YILMAZ ve ark., 1985).

Geçirimsizlik üzerine pek çok faktör etkir. Bunlar arasında çimento dozajını sayabiliriz. Dozajın 300 kg/m^3 üstünde kalması geçirimsizlik açısından bir güvencedir.

Çimento çeşitlerinin yüzey sertliği üzerindeki etkileri büyüktür, hatta değişik incelikteki portland çimentolarından yapılmış betonlarda yüzey sertliği ve dayanım için farklı değer bulmak mümkündür. Bu nedenle her türlü çimento ve aynı tür çimentonun farklı incelikleri için kalibrasyonunun yeniden yapılması gerekir.

Çimento oranındaki değişmelerin gösterge üzerinde oluşturacağı değişiklikler nedeniyle dayanım saptamalarında ortaya çıkacak yanlışlar yaklaşık $\%+10$ u geçmez. Yüksek orandaki çimento karışımı, dayanımın olması gerekenden daha küçük saptanmasına, düşük orandaki çimento karışımı ise dayanımın olması gerekenden daha büyük saptanmasına neden olur (AKMAN, 1985).

2.2.2. Çimentolarda Kimyasal Özellikler

TS EN 197-1 çimentoları için öngörülen kimyasal özellikler Tablo 2.3'de "karakteristik" değerler olarak gösterilmiştir. Gene 1997'den önceki çimento standartlarında yer alan MgO kısıtlaması bu tabloda yer almamaktadır(ancak klinker MgO içeriği için $\%5$ sınırı belirtilmiştir). Ayrıca CEM IV çimentolarının puzolanik özellik kriterini sağlamaları gerekmektedir.

Tablo 2.3. Çimentolarda kimyasal özellikler için karakteristik değerler (YEGİNOBALI ve ERTÜN, 2004)

Özellik	Standard	Çimento Tipi	Dayanım Sınıfı	Özellikler
Kızdırma Kaybı	EN196-2	CEM I, CEM III	Hepsi için	$\leq \% 5.0$
Çözünmeyen Kalıntı	EN196-2	CEM I, CEM III	Hepsi için	$\leq \% 5.0$
Sülfat Miktarı (SO ₃) olarak	EN196-2	CEM I CEM II CEM IV CEM V	32.5 N 32.5 R 42.5 N	$\leq \% 3.5$
		CEM III	42.5 R 52.5 N 52.5 R	$\leq \% 4.0$
Klorür İçeriği	EN 196-21	Hepsi için	Hepsi için	$\leq \% 0.10$
Puzolanik Özellik	EN 196-5	CEM IV	Hepsi için	Deneyi Sağlar

Portland çimentosunda, kalker ile kilin belirli oranlarda karıştırılarak yüksek derecede pişirilmesi sonucu çeşitli oksitler elde edilir. Portland çimentolarında oluşan ana oksitler ve yaklaşık % miktarları şunlardır: CaO (%60-67), SiO₂ (%17-25), Al₂O₃ (%3-8), Fe₂O₃ (%0,5-6), SO₃ (%1-3), MgO (%1-4), Na₂O+K₂O (%0,1-1,3). SO₃ ve MgO istenmeyen maddelerdir. Çünkü su ile yavaş reaksiyona girer ve hacim genişmesi yapar (OYMAEL, 2002).

Çimento içindeki oksitlerde birbirleriyle reaksiyona girerek bileşikleri meydana getirir. Pratik olarak portland çimentosunun aşağıdaki dört ana bileşenden meydana geldiği kabul edilir (SMİTH, 2001).

Tablo 2.4. Portland çimentosunun ana bileşikleri

Bileşik	Kimyasal Formül	Kısaltma
Trikalsiyum silikat	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Dikalsiyum silikat	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Trikalsiyum alüminat	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Tetrakalsiyum alüminoferrit	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Portland Çimentosu Bileşiklerinin Örneksele Bileşimleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Portland Çimentosu Bileşiklerinin Örneksele Bileşimleri (YOUNG, J.F., EDUC, J., 1981)

Çimento Türü	ASTM C 150 Tanımlaması**	Bileşim, Ağ. (%)*			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Genel amaçlı	I+	55	20	12	9
Orta sulu tepkimeli, orta sülfat dirençli	II	45	30	7	12
Hızlı sertleşen	III	65	10	12	8
Düşük sulu tepkime ısıllı	IV	25	50	5	13
Sülfat dirençli	V	40	35	3	14

* Eksik yüzdeler, alçı ve MgO, alkali sülfatlar gibi azınlık bileşenlerdir.

+ En yaygın çimento türü

** Yaklaşık TSE sayıları için

Bu bileşikler aşağıda verilen Bogue formülleri ile bulunur:

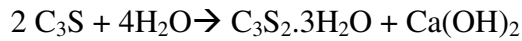
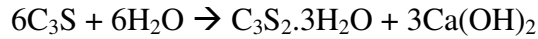
$$C_4AF = 3,043 Fe_2O_3$$

$$C_3A = 2,650 Al_2O_3 - 1,692 Fe_2O_3$$

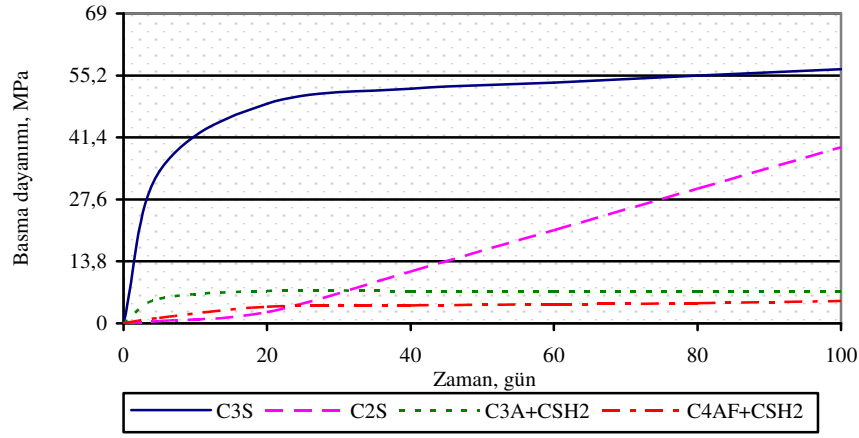
$$C_3S = 4,071 CaO - (7,600 SiO_2 + 6,718 Al_2O_3 + 1,430 Fe_2O_3 + 2,852 SO_3)$$

$$C_2S = 2,867 SiO_2 - 0,7544 C_3S$$

Portland çimentosu sulu tepkime adı verilen tepkimelerle sertleşir. Bu tepkimeler karmaşık olup tümüyle anlaşılammıştır. Trikalsiyum silikat (C₃S) ve dikalsiyum silikat (C₂S) portland çimentosunun ağırlıkça %75'ini oluşturur ve çimentonun sertleşmesi sırasında bu bileşikler suyla tepkiyince meydana gelen ana sulu tepkime ürünü trikalsiyum silikat hidrattır. Bu malzeme son derecede küçük mikron altı parçacıklar halinde oluşur ve asıltılı pelte halindedir. Kalsiyum hidroksit, aynı zamanda C₃S ve C₂S'nin aşağıda verilen sulu tepkimesiyle, kristalli bir malzeme olarak elde edilir:



Şekil 2.1. Saf çimento hamurunun, olgunlaşma (sertleşme) süresine bağlı olarak basınç dayanımındaki artış (SMİTH, 2001) (CSH_2 , $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 'nun kısaltılmışıdır)



Trikalsiyum silikat (C_3S) hızla sertleşir ve çimentonun erken dayanım kazanmasını sağlar (Şekil 2.1). C_3S sulu tepkimesinin çoğu iki günde tamamlanır ve dolayısıyla erken dayanım kazanan portland çimentosu daha büyük miktarlarda C_3S içerir.

Dikalsiyum silikatın (C_2S) suyla tepkimesi daha yavaştır ve birinci haftadan sonraki dayanım artışından sorumludur (Şekil 2.1). Trikalsiyum alüminat (C_3A) ısı çıkararak hızla sulu tepki verir. C_3A 'nın erken sertleşmeye katkısı azdır ve sülfat dirençli Tip V tür çimentolarda az miktarda bulunur (Şekil 2.1). Tetrakalsiyum alüminoferrit (C_4AF) çimento üretimi sırasında fırındaki taşlaşma sıcaklığını düşürmek gibi bir özelliğe sahiptir.

Sulu tepkimelerin tamamlanma derecesi çimentonun dayanımını ve kalıcılığını belirler. Taze beton yerine konduktan sonraki birkaç gün içinde sulu tepkime hızlıdır. Bu erken sertleşme süresi içinde çimentonun suyunu muhafaza etmesi, buharlaşmanın önlenmesi veya azaltılması önemlidir.

Şekil 2.1, farklı ASTM türü çimentolar içindeki ana bileşiklerin basınç dayanımının sertleşme süresiyle nasıl değiştiğini göstermektedir. 28. günde basınç dayanımının çoğuna ulaşılmakla birlikte betonun sertleşmesi yıllarca devam eder (SMİTH, 2001).

Betonlarda kimyasal hasar oluşturan iç etkiler şunlardır:

1) Çimento hamurunun hacim sabitliğini bozan kimyasal ögeler vardır. Bunlar çimento içinde mevcut olan serbest kireç (max %2), MgO (max %5) ve serbest SO_3 (max %3) tür.

2) Beton karma suyunun oluşturduğu ve ileri yaşlarda oluşturacağı etkiler.

3) Alkali-agrega reaktivitesi

(AKMAN, 1987, s.61).

Alkali-agrega reaksiyonu ile betonlarda meydana gelen hasar çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunların başında kullanılan çimentonun içerdiği alkalinite yüzdesi ile agreganın içerdiği aktif bileşimli minerallerin yüzdesi büyük önem taşır. Çimento alkalinitesi belli bir değere erişince betonda şişme görülmektedir. Bu şişme alkalinite miktarı ile doğru orantılı olarak artmamaktadır. Alkali-agrega reaksiyonu için mutlaka suya ihtiyaç olduğu halde, su içinde bekletilen betonlarda şişme meydana gelmektedir. Çimento dozajının artışı şişmenin de artmasına neden olmaktadır. Maksimum şişme, betonun doygun rutubetli atmosferde tutulması halinde görülmektedir.

Pratikte çimento içinde bulunan alkali oksit yüzdesi büyük önem taşımaktadır. Ülkemiz standartlarında herhangi bir sınır değer bulunmamakla beraber, ASTM standartlarında çimento içindeki alkalinite miktarının ($\%Na_2O + \%0,658K_2O$) $\%0,6$ 'dan fazla olmaması şartı bulunmaktadır. Ancak gerçekte çimento alkalinite yüzdesinden çok, beton içinde bulunan toplam alkalinite miktarının şişmeye neden olduğu belirlenmiştir. Bu durumda, çimento dozajının yüksek olması halinde, daha düşük alkalinite yüzdesinin de zararlı olabileceği söylenebilir. Pratik olarak, $1 m^3$ beton içinde alkalinite miktarının 3 kg.dan az olması uygun görülmektedir (ŞENSÖZ, 2002).

2.3. Standartlarda Sınır Getirilen Çimento Özellikleri

Tablo 2.2 ve 2.3'de görüldüğü gibi standart, çimentonun bazı fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerine sınır getirmektedir. Tablo 2.3'e göre bazı kimyasal sınırlar ancak belirtilen çimento tipleri için geçerlidir. İlgili çimento özellikleri ve sınırlama nedenleri aşağıda kısaca açıklanmaktadır (YEĞİNOBALI ve ERTÜN 2004).

Basınç Dayanımı:

Çimentonun en önemli özelliğidir. Standart kum ile yapılmış harç numuneler üzerinde ölçülür. Erken dayanım için 2 veya 7 günlük yaşlarda, standart dayanım için 28 günlük yaşta elde edilen değerler standartta belirtilen karakteristik değerden daha az

olmamalıdır. Beton bileşimi ve yapımı ile ilgili parametreler değişmediği takdirde çimento dayanımı arttıkça beton dayanımı da artacaktır.

Priz Başlama süresi:

Normal kıvamdaki çimento hamurunun plastikliğini kaybetmeye başladığı zamana kadar geçen süredir. Vicat cihazı ile belirlenir. Taze betonun işlenebilmesini kaybetmesi ile ilişkili olduğu için standartlarda belirtilen süreden daha az olmamalıdır (Genellikle böyle bir süre içinde taze betonun karıştırılıp, taşınıp, kalıba yerleştirilerek sıkıştırılabileceği kabul ediliyor).

Priz Bitiş Süresi:

Performansa dönük olarak hazırlanan yeni standartta priz bitiş süresi sınırlandırılmamıştır.

Hacim Sabitliği:

Karma oksitlere katılmayarak serbest kalan CaO ve MgO, çimento içinde az miktarda bulunmalarına rağmen harç veya beton sertleştikten sonra hidrate olarak hacim genişmesi ve çatlamalara yol açabilirler. CaO; hammaddelerin doğru orantıda harmanlanmaması, iyi öğütülmemesi veya yeterince pişirilmemesi sonucu serbest halde bulunabilir. Fırında yüksek sıcaklıkta oluşan kristal yapısı dolayısı ile hidratasyonu gecikmeli olarak meydana gelir. MgO (periklas) genellikle kalker içinde bulunur. CaO'dan daha sıkı bir kristal yapıya sahip olduğundan hidratasyonu daha gecikmeli ve yavaştır. Gene de sertleşmiş betonun hacim sabitliğine zarar verebilir. Bu konuda yapılan deneyde çimento hamuru kaynar suda hızlandırılmış küre ve hidratasyona tabi tutulur. Serbest CaO içeriğine bağlı olarak hamurun genişmesi yerleştirildiği Le Chatelier halkalarının iğneleri arasındaki mesafenin açılması ile belirlenir. Açılma değerinin standarttaki sınırı aşmaması gerekir.

Kükürt Trioksit (SO₃) İçeriği:

Sülfatlar çimento içine hammaddelerden, katkılardan veya yakıttan girebilir. Ayrıca, C₃A hidratasyonunu kontrol amacı ile klinker kalsiyum sülfat ile öğütülmektedir. Harç veya beton sertleştikten sonra içlerinde kalan veya dışardan gelen sülfat, alçı ve etrenjit oluşturarak hacim genişmesi ve çatlama yapabilir. Bu nedenle kimyasal analiz sonucu çimentoda bulunan SO₃ miktarı standartlarda verilen sınırı aşmamalıdır.

Klorür İçeriği:

Klorürler çimento içine hammaddelerden veya katkılardan girebilir. Sertleşmiş harç veya beton içinde bileşenlerden veya dışarıdan gelen klorürün en büyük sakıncası beton içindeki çelik donatıda ve metallerde korozyon riskini arttırmasıdır. Ayrıca, higroskopik madde olarak harç ve betonu rutubetli tutar. Bu nedenlerle kimyasal analiz sonucu çimentoda bulunan klorür miktarı standartlarda verilen sınırı aşmamalıdır.

Kızdırma Kaybı:

Uzun süre depolanmış, rutubete ve havaya maruz kalmış çimento başta içindeki serbest CaO ve MgO olmak üzere kısmen hidrate olur sonra havanın da etkisi ile karbonatlaşır. Kısacası çimento bayatlamaya başlar. Bu reaksiyonların ne ölçüde yer aldığını anlamak için çimento 950-1000 °C arasında ısıtılır ve ağırlık kaybı yüzde olarak belirlenir. Kızdırma kaybı özellikle rutubetin buharlaşmasından ve CaCO₃ dan CO₂ in ayrışmasından kaynaklanır. Standartlarda verilen sınırı geçmemelidir.

Çözünmeyen Kalıntı:

Normal olarak üretilmiş katkısız portland çimentosu bileşenleri HCl içerisinde tamamen çözünürler. Çözünmeyen kısım varsa bu iki şeyden kaynaklanabilir: 1) Döner fırında pişirme ve ilgili reaksiyonlar tamamlanamamıştır ve/veya 2) Çimentoda mineral katkı vardır. Çözünmeyen kalıntı standartlarda verilen değeri geçmemelidir.

Puzolanik Özellik:

Bu özellik sadece CEM IV tipi Puzolanik çimentolar için istenmektedir. Deneyde hidrate çimento ile temas halindeki çözeltideki Ca(OH)_2 miktarı çözeltiyi doymun hale getirecek miktardan daha düşük bulunuyorsa sonuç olumlu kabul edilmektedir.

Toplam Organik Karbon (TOC):

Katkı maddesi olarak kullanılan kalkerde bulunabilecek organik karbon betona hava sürükleyen kimyasal katkılarla olumsuz etkileşir. Kimyasal katkı ve oluşturduğu hava kabarcıkları karbon etrafında kümelenirler ve betonun donma-çözülme direncini arttırmada etkili olamazlar. Bu nedenle TOC miktarının standartta belirtilen sınırları geçmemesi istenir.

Kil Muhtevası (Metilen Mavisi Deneyi):

Çok ince taneli olan ve nem durumuna göre hacim değişikliği gösteren killerin miktarı çimento katkı maddesi olarak kullanılacak kalkerde (ve genelde beton agregalarında) sınırlandırılmaktadır. Aksi takdirde çimento ve çimentolu üründe karışım suyu ihtiyacı artacak, hacim sabitliği ve agrega-çimento hamuru arayüzeyi olumsuz olarak etkilenecektir.

İncelik:

Performansa dönük olarak hazırlanan yeni standartta çimento ve mineral katkı maddelerinin tane inceliği konusunda herhangi bir sınır getirilmemiştir. Ancak bazı şartnamelerde (ve eski standartlarda) bu maddelerin en az belirli bir inceliğe sahip olması istenebilir. Tane inceliği arttıkça hidrasyon ve kimyasal reaksiyonlar hızlanacak, erken dayanım artacaktır. Diğer taraftan, gerekli öğütme enerjisi de artacak ve belirli bir kıvam için gereken su ihtiyacı da artış gösterebilecektir.

2.4. Puzolanlar

2.4.1. Puzolanların Tanımı ve Çeşitleri

Tek başlarına bağlayıcı olmayan fakat kireç, çimento ile karıştırıldığında su ile reaksiyona girerek bağlayıcı madde özelliği taşıyan maddelere puzolan denir. Bir puzolana portland çimentosu karıştırıldığı vakit çimentonun hidratasyonu sonunda meydana gelen Ca(OH)_2 ile SiO_2 ve Al_2O_3 arasında vuku bulan reaksiyon sonunda puzolan yine bağlayıcılık özelliği kazanır. Bu reaksiyonlar sonunda Ca(OH)_2 tespit edilir yani çözülmez duruma getirilir. Bu özellikte başarıya ulaşabilmek için puzolanın özgül yüzey alanı mümkün olduğu kadar büyük olmalı. Yani puzolan mümkün olduğu kadar ince öğütülmelidir. Bu husus puzolanda aranılan en önemli özelliktir. Diğer bir özellik ise; Al_2O_3 ve SiO_2 in reaktif özelliği yoktur. Reaktif özellik ancak kireçle meydana gelir. Bu nedenle bir puzolanda CaO miktarı az olmalıdır. Bir diğer ifadeyle puzolanlarda Al_2O_3 ve SiO_2 miktarı fazla olmalıdır (OYMAEL, 2002).

Mineral katkı türleri ve TS EN 197-1 de öngörülen kimyasal bileşimleri aşağıda verilmiştir (YEĞİNOBALI ve ERTÜN, 2004).

Doğal Puzolan:

Doğada bulunan puzolanik özellikte madde ve kayaçlardır. Genellikle volkanik kökenlidirler. Türkiye de “tras” olarak adlandırılırlar. TS EN 197-1’e göre doğal puzolanlarda reaktif silis miktarı en az %25 olmalıdır.

Kalsine Edilmiş Doğal Puzolan:

Puzolanik özellikleri ısı işlem uygulanarak kazandırılmış olan doğal madde ve kayaçlardır. Reaktif silis içerikleri en az %25 olmalıdır.

Granüle Yüksek Fırın Cürufu:

Yüksek fırında pik demir elde edilirken demir cevheri içindeki SiO_2 ve Al_2O_3 içeren gayri saflıklar yumuşatıcı olarak katılan kalkerdeki CaO tarafından bağlanır. Bu

şekilde oluşan cürufun bileşimi portland çimentosuna büyük benzerlik gösterir. Fırın çıkışında hızla soğutulması ve en az 2/3 oranında camsı faz içermesi gerekir. Ayrıca içindeki CaO, MgO ve SiO₂ miktarları toplamı gene en az 2/3 oranında olmalıdır. (CaO+ MgO)/ SiO₂ orantısının ise 1,0'dan fazla olması istenmektedir.

Uçucu Kül:

Çok ince öğütülmüş kömür yakan fırınların baca gazlarına karışan ve çoğunlukla çimentodan ince olan kül tanecikleri elektrostatik yöntemlerle tutularak ayrılırlar. Genellikle kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde elde edilir. Kızdırma kaybı 1 saatte %5'i geçmemelidir. Kızdırma kaybı %5-7 arasında ise kül koşullu olarak çimentoda kullanılabilir.

Silisi Uçucu Kül:

Reaktif CaO oranı %10'dan az olan puzolanik özellikli uçucu küldür. Serbest CaO içeriği %1'den fazla olmamalıdır. Serbest CaO değeri %2,5'e kadar olan küller koşullu olarak kullanılabilirler. Reaktif SiO₂ %25'den fazla olmalıdır.

Kalkersi Uçucu Kül:

Reaktif CaO oranı %10'dan fazla olan bağlayıcı ve/veya puzolanik özellikli uçucu küldür. Reaktif CaO miktarı %15'e kadar olan küllerde reaktif SiO₂ %25'den fazla olmalıdır. Reaktif CaO miktarı %15'den fazla olan küller koşullu olarak kullanılabilirler. Hacim genleşmesi 10 mm.yi geçmemelidir.

Pişmiş Şist:

Yaklaşık 800 °C de pişirilen şist bileşimi itibari ile puzolanik ve bağlayıcı özellikler gösterir. Çimento gibi test edildiğinde 28 günlük basınç dayanımı en az 25 MPa olmalıdır. Hacim genleşmesi 10 mm.yi geçmemelidir.

Kalker (Kireçtaşı):

CaCO₃ içeriği en az %75 olmalıdır. Kil içeriği %1,2'yi geçmemelidir. Standartta toplam organik karbon (TOC) değerinin en fazla %0,20 (LL) ve %0,50 (I) olarak sınırlandırıldığı iki sınıfa ayrılmıştır.

Silis Dumanı:

Silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsın kömürle indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli baca tozudur. Reaktif silis içeriği en az %85 olup BET özgül yüzeyi en az 15 m²/g olmalıdır. Kızdırma kaybı 1 saatte %4'ü geçmemelidir.

Zeolitler:

Zeolitler, çimento veya betonda doğal puzolan olarak kullanımını da mümkün kılmaktadır. Çin'de ticari olarak kullanıma açık, başlıca klinoptilolit mineralinden oluşan bir doğal zeolit numunesi üzerinde gerçekleştirilen deneyler, test edilen malzemenin, silis dumanı ve uçucu kül arasında bir puzolanik aktiviteye sahip olduğunu göstermiştir (POON, C. S., LAM, L., KOU, S. C., LİN, Z. S., (1999).

Zeolitlerin bileşimleri genel olarak hidrate alüminyum silikat olup bir miktar potasyum, sodyum, kalsiyum ve bazen baryum ve stronsiyum vs. bulunur. Billurları camsı, beyaz ve saydam, enklüsyonların tesiriyle bazen renkli; sertlikleri 4-6, yoğunlukları 2-2.5 g/cm³ tür. Asitlerde silisli bir tortu bırakarak erirler ve üfleçte kabarak kaynarlar (Yunanca zeolit "kaynayan taş" demektir). Zeolitlerin oluşumlarında önemli rol oynayan sıcak ve madensel sulardır. Zeolitler 100 °C ve daha yüksek ısıda bileşimlerindeki suyun önemli bir miktarını kaybettikleri gibi nemli havadan da %4-14 oranında su çekerler. Suyu kaybettikleri zaman saydamlıkları kalmaz. Fakat birçoğu su alınca tekrar eskisi gibi saydam olurlar. Bu durum su kaybı olduğu zaman billurun bünyesinin değişmediğini gösterir. Yani su tekrar billurun ağsal yapısı arasından adeta bir süngerin ince deliklerine girer gibi geçer (SAYAR, 1960). Zeolit yapıda, metal katyonları ve su molekülleriyle dolu, birbiriyle kanallarla bağlanmış boşluklar bulunur (MEİER, 1968).

Zeolitler başlıca fiziksel ve kimyasal özellikleri olan; iyon değişikliği yapabilme adsorbsiyon ve buna bağlı moleküler elek yapısı, silis içeriği, ayrıca tortul zeolitlerde açık renkli olma, hafiflik, küçük kristallerin gözenek yapısı zeolitlerin çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmalarına neden olmuştur (DPT, 1996).

2.4.2. Doğal Puzolanların Puzolanik Aktivitesi

Puzolanik aktivite kavramı bir puzolanın bağlayabileceği en fazla Ca(OH)_2 miktarını ve bağlanma işleminin hızını ifade etmektedir. Bahsedilen her iki değişken de puzolanın özelliklerine ve içerisinde bulunan aktif fazların kalite ve miktarına bağlıdır. Genel olarak, puzolanların heterojen bir yapıda olmaları ve hidrasyonun karmaşık yapısı nedeniyle puzolanik aktiviteyi açıklayıcı bir model geliştirilememektedir.

Puzolanların aktivitesi ve sonuçlanma ilişkin genel özellikleri şunlardır:

1. Puzolanın bağladığı Ca(OH)_2 miktarının fazla olması, bu puzolanda aktif olan madde miktarının da fazlalığına işarettir.
2. Bir puzolanın kısa dönemdeki aktivitesi esas olarak özgül yüzey alanına, buna mukabil uzun dönemdeki aktivitesi ise kimyasal ve mineralojik kompozisyonuna bağlıdır.
3. Bir puzolanın bağladığı Ca(OH)_2 miktarı, puzolanın fazlarının içerisindeki aktif SiO_2 miktarı ile ilişkilidir.
4. Belirli sınırlar dâhilinde kireç-puzolan karışımlarında, kireç/puzolan oranının artması Ca(OH)_2 bağlanmasını artırır.
5. Zeolitik puzolanlar camsı puzolanlara göre genel olarak daha aktiftir.
6. Farklı puzolanlarda bulunan camsı fazlar farklı kireç bağlayabilme yeteneğine sahiptir.
7. Puzolan kireç karışımlarında ortamda su miktarının fazla olması bağlanan kireç miktarını artırır.

Isıtıldıklarında birçok doğal puzolan, aktiviteyi etkileyen olumlu ve/veya olumsuz kimyasal ve yapısal değişikliklere uğrar. Olumlu etkiler genel olarak puzolanın camsı ya da zeolit fazındaki suyun kaybı ve killerin kristal yapısının bozulmasıyla olur. Bununla beraber, ısıtılmayla hâsıl olan olumsuz etkiler ise özgül yüzey alanının azalması, camsı fazın bozunması (devitrification) ve kristalleşme neticesindedir. Bu iki etkinin bir araya

gelmesiyle ısı işlemin puzolanın aktivitesine ne yönde tesir edeceği puzolanın tabiatına, uygulanan sıcaklığa ve ısı işlemin süresine bağlıdır (ERDOĞDU ve ark., 2003).

2.4.3. Puzolanik Aktivite Ölçümü İçin Önerilen Yöntemler

Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği, “puzolanik aktivite” olarak tanımlanabilmektedir. Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis+alümin+demir oksit” içermesi gerekmektedir.

Herhangi bir puzolanın yetkinliğinin değerlendirilmesi için puzolanın Ca(OH)_2 bağlayabilmesi ve reaksiyon hızı ile tanımlanan aktivitesinin belirlenmesi gerekir. Fakat her çeşit puzolana uygulanabilecek hız ve hassasiyet açısından kabul edilebilir bir test yöntemi henüz yoktur. Ayrıca farklı deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birbirlerini doğrular şekilde çıkmayabilir. Puzolanların aktivitesinin belirlenebilmesi için önerilen yöntemler kimyasal, fiziksel ve mekanik olarak üç ana grupta toplanmaktadır.

Kimyasal test yöntemlerinde puzolan doymuş kireç çözeltisine konduğunda ortamdaki belirli süreler içerisinde ortamda kalsiyum iyonları azalması tespit edilir. Böylelikle, herhangi bir puzolanın Ca(OH)_2 bağlayabilme kapasitesi ve hızı ölçülür. XRD (X-Ray Diffraction) teknikleriyle de kireç-puzolan karışımlarında bağlanmış Ca(OH)_2 miktarı tayin edilebilmektedir. Bu şekilde yapılan ölçümlere temel oluşturan bir araştırmada altı aylık ve bir yıllık numunelerde bağlanmış Ca(OH)_2 ve dayanım arasında yüksek bir korelasyon bulunmuştur.

Kireç-puzolan karışımında, puzolanik tepkimelerin sonucu olarak karışım sertleşir ve dayanım kazanır. Dayanım artışı puzolanın bağladığı kireç miktarı arttıkça artar. Fakat bu iki parametre arasında kolayca tanımlanabilecek bir ilişki yoktur. Aynı durum portland çimentosu-puzolan karışımlarının dayanımı ile kireç bağlanma miktarı arasındaki ilişki için de geçerlidir. Bu sebeple, bağlanan kireç miktarının ölçülmesine dayanan test yöntemleriyle, çimentoda puzolan kullanımıyla elde edilecek dayanımları tahmin etmek mümkün değildir. Dolayısıyla, puzolanların aktivitesinin değerlendirilmesi hususunda kireç-puzolan ya da portland çimentosu-puzolan karışımlarının doğrudan dayanımını bulmak daha sağlıklı görünmektedir.

Mekanik yöntemlerden olmak üzere geliştirilmiş test yöntemlerinde puzolan, kireç ya da portland çimentosu ile belirli miktarlarda karıştırılır. Elde edilen bağlayıcı ile 4x4x16 cm'lik harç numuneleri hazırlanır ve bu numunelerin belirli sürelerdeki basınç dayanımı tespit edilir. Fakat bu türden mekaniksel test yöntemleri, kireç-puzolan ya da portland çimentosu-puzolan karışımlarında dayanım kazanımının zamanla çok yavaş olmasından dolayı, bazı olumsuzluklar içermektedirler (ERDOĞDU ve ark., 2003).

Puzolanik aktivite, puzolanik malzemeyle yapılan deneyler sonucunda tayin edilmelidir. ASTM standardına göre önce “500 gr portland çimentosu+1375 gr kum+242 ml su” kullanarak kontrol harcı hazırlanmaktadır. Daha sonra da, “400 gr portland çimentosu+100 gr puzolan+1375 gr kum+kontrol karışımının gösterdiği akmayı sağlayabilecek kadar su” kullanılarak puzolanlı harç elde edilmektedir. Bu iki harçtan 5 cm'lik küp numuneler hazırlanarak 7 ve 28 gün sonunda basınç deneyine tabi tutulmaktadır. TS EN 450 no.lu standarda göre, birisi “kütlece %75 referans çimento+%25 puzolan” ile hazırlanmış standart harç numunesi ve diğeri ise sadece referans çimentodan hazırlanmış standart harç numunesi üzerinde basınç dayanımı deneyleri yapılmaktadır (TS EN 450, 1988).

Puzolanik aktivite, “dayanım aktivite indeksi” olarak adlandırılan bir değer hesaplanmasıyla da ifade edilmektedir. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

Burada;

A= Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı,

B= Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır.

Dayanım aktivite indeksinin belirli bir değerden daha az olmaması gerekmektedir. Örneğin, doğal puzolanlar için, ASTM standartları, bu değer en az 75 olması gerektiğini belirtmektedir (ASTM C 618, 1994). Türk standartların göre ise, bu değer en az 70 olmalıdır (TS 25, 1975).

2.4.4. Doğal Puzolanların Puzolanik Aktivitesini Etkileyen Etmenler

Tüm puzolanların ve dolayısıyla doğal puzolanların aktivitesi açısından özgül yüzeyin, kimyasal kompozisyonun ve mineralojik yapının büyük rol oynadığı bilinmektedir. Fakat bunların birbirleriyle etkileşim içerisinde olmaları nedeniyle aktivite mekanizması oldukça karmaşıktır. Genel olarak, puzolan tarafından bağlanan

kireç miktarının aşağıdaki etmenlere bağlı olduğu birçok araştırma tarafından doğrulanmıştır.

1. Aktif fazların yapısı
2. Puzolan içerisindeki aktif fazların miktarı
3. Aktif fazların SiO₂ içeriği
4. Karışımın kireç/puzolan oranı
5. Kürleme süresi

Bununla beraber kirecin bağlanma hızı;

1. Puzolanın özgül yüzey alanı
2. Su/katı madde oranı
3. Sıcaklık

etkenlerine bağlıdır.

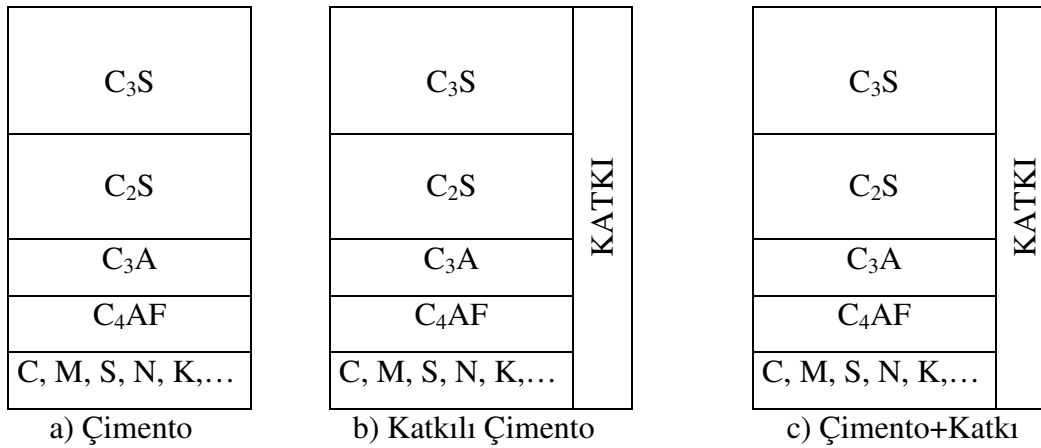
Doğal puzolan içeren sistemler için dayanım uzun dönemde doğal puzolanın Al₂O₃+SiO₂ miktarına bağlıdır. Kısa dönemde ise doğal puzolanın özgül yüzey alanı dayanım açısından birinci derecede etkilidir. Al₂O₃+SiO₂ içeriğinin artmasıyla uzun süreli dayanımın da artacağı yolundaki düşünce Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği tarafından yapılmış olan bir çalışmada da doğrulanmıştır. Yine bu çalışmanın verilerine göre artan Fe₂O₃ konsantrasyonu, en azından yüksek konsantrasyonlarda (%8'in üzerinde), doğal puzolanın aktivitesini azaltmaktadır.

Özgül yüzey alanı ile harç basınç dayanımı olarak tespit edilmiş puzolanik aktivite arasında her puzolan için geçerli olan genel bir bağıntı yoktur. Yapılan deneylerde dayanımın incelikle arttığı ve bu artışın yüksek inceliklerde nispeten daha az olduğu tespit edilmiştir. Aynı durum bir başka çalışmada bağlanmış kireç miktarı için de tespit edilmiştir (ERDOĞDU ve ark., 2003).

2.4.5. Puzolanik Katkıların Etkileri

TS EN 197-1 de değişik mineral katkıları ve bunların çeşitli kombinasyonlarını içeren çok sayıda çimento türüne yer verilmiştir. Gerçekten uygun özelliklerdeki mineral katkıların çimento üretiminde kullanımı önemli ekonomik, çevresel ve teknik avantajlar sağlamaktadır. Örnek olarak bir mineral katkının muhtemel etkilerini kısaca gözden geçirelim. Şekil 2.2 a) da katkısız bir portland çimentosu bileşimi

görülmektedir. Hatırlanacak olursa, bileşimin %90 kadarı dört karma oksitten oluşur. Bunlar C_3S ve C_2S olarak belirtilen kalsiyum silikatlar ile C_3A ve C_4AF olarak belirtilen kalsiyum alüminatlardır. Şekil 2.2 b) ve c) de çimento belirli bir miktarda katkı ile oluşturulmuştur. Mineral katkılar genellikle klinker elde edildikten sonra klinkerle birlikte öğütülerek katılırlar. Dolayısı ile çimento elde etmek için daha az hammadde (doğal kaynak) ve daha az enerji kullanılmakta, ortaya daha az sera gazı çıkmaktadır. Katkı maddesi endüstriyel atık ise çevresel yarar daha da fazladır. Bu arada toplam bağlayıcı içindeki dört karma oksidin göreceli miktarları katkı miktarına bağlı olarak azalmıştır.

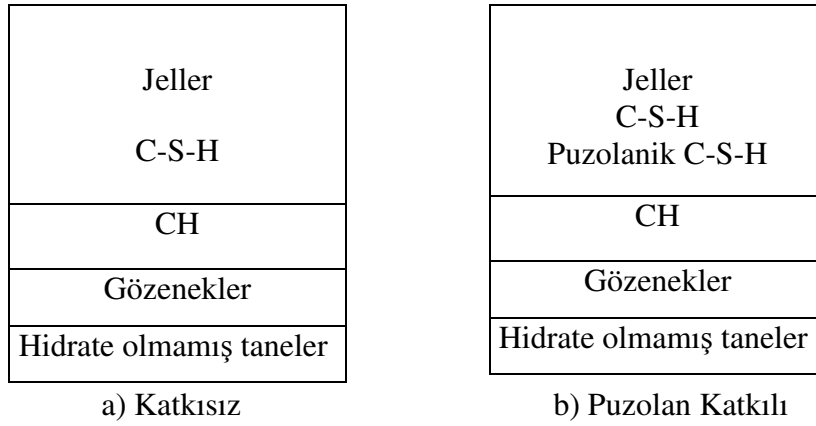


Şekil 2.2. Çimento ve Mineral Katkı

Çimento su ile karıştırıldığında kalsiyum silikatlar bağlayıcı özellikteki kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelini oluştururlar ve bir miktar kireç hidrat, CH ortaya çıkar. C_3S erken dayanıma ve hidrasyon ısısına daha fazla katkıda bulunur, daha fazla kireç açığa çıkarır. Kalsiyum alüminatlar da jel meydana getirirler. C_3A hidrasyon ısısını artırır, sülfatlara karşı direnci azaltır.

Şekil 2.3 a) da katkisiz çimento hamurunun bileşimi gösterilmiştir. Bağlayıcı özellikteki C-S-H jelleri ile kalsiyum alüminat jelleri hamurun yarısından fazlasını oluşturmakta, kireç hidrat CH açığa çıkmakta ve gözenekler oluşmaktadır. CH ve gözenekler dayanım ve durabiliteyi olumsuz etkileyen unsurlardır. Katkılı çimentonun hidrasyonu ve özellikleri ise farklıdır: Karma oksitlerden C_3A azaldığı için sülfat direnci artacak, C_3S ve C_3A azaldığı için hidrasyon ısısı ve erken dayanım azalacaktır. C_2S ve C_3S azaldığı için açığa çıkan CH miktarı da azalacaktır. Bu da gene sülfat

direncini ve dayanıklılığı artıracaktır. Puzolanik özelliklere sahip olduğu kabul edilirse, katkı kalan CH yi zamanla bağlayarak yeni (puzolanik) C-S-H jeline dönüştürecek ve gözenekleri tıkayacaktır. Dolayısı ile zamana bağlı olarak dayanım ve dayanıklılıkta artış söz konusudur. Özet olarak, Şekil 2.3 b) de gösterildiği gibi katkılı çimento hamurunda bağlayıcı jeller artmakta, CH ve gözenekler azalmaktadır.



Şekil 2.3. Çimento Hamur Yapıları

Kuşkusuz bu genel etkiler klinker ve katkı özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Puzolanik olmayan bazı katkıların bile ince öğütüldüklerinde harç ve betonda su ihtiyacını azalttıkları, hidrasyonu hızlandırdıkları ve gözenekleri tıkayarak dayanıklılığı arttırdıkları bilinmektedir.

Sonuç olarak, çimentoya katılan mineral katkılar:

- Ekonomi ve enerji tasarrufu sağlanması,
- Doğal kaynakların ve çevrenin korunması, sera gazlarının azaltılması,
- Hidratasyon ısısının azaltılması,
- Çimento ürünlerinde işlenebilmenin kolaylaştırılması, dayanıklılığın ve zamanla dayanımın artırılması

gibi konularda yararlı olabilmektedir. Erken dayanımlarda görülebilecek azalma çimentoyu daha ince öğüterek veya klinker özelliklerini değiştirerek çözümlenebilmektedir (YEĞİNOBALI ve ERTÜN, 2004).

Puzolanlı çimentoların PÇ'ye göre üstünlükleri şunlardır:

1. Kimyasal mukavemeti fazladır. Yani her türlü zararlı sulara dayanıklıdır.
2. Priz esnasında daha az ısı çıkarır. Bu nedenle baraj inşaatlarında, kütle betonlarında kullanılabilir.
3. Serbest kireç tutulduğu/bağlandığı için geçirimsizliği daha az olan beton ve harç üretilir.
4. Geçirimsizliği az olduğu için donmaya karşı dayanıklıdır.
5. Çimento maliyeti düşüktür.

Puzolanlı çimentoların PÇ'ye göre sakıncaları şunlardır:

1. Puzolanlı çimentolarda çimentonun reaksiyon hızı düşüktür. Bundan dolayı betonda ilk günlerde mukavemet düşüktür. Fakat kirecin bağlanmış olması nedeniyle son mukavemeti PÇ değerinden daha fazla olabilir.
2. Hidratasyon ısısı düşük olduğu için, soğuk havalarda kullanılmaya elverişli değildir.
3. Puzolanlı çimentolarla üretilen betonlar, daha uzun süre ve daha iyi koşullarda korunmalıdır.

(OYMAEL, 2002).

2.5. Çimentonun Tiplerine Göre Kullanılacakları Yerler

Yeni çimento standardı TS EN 197-1 "Genel Çimentolar" ı kapsar. Bu standartta yer alan tüm çimentolar genel amaçlı olarak inşaatlarda kullanılabilirler. Esasen bir çimento fabrikası hammadde durumuna ve piyasa koşullarına bağlı olarak standartta belirtilen çok sayıda çimento tipinden en fazla 3-4 tanesini üretmektedir. Dolayısı ile bunların hepsi veya çoğunluğu genel amaçlı olarak kullanılabilir. Yüksek dayanım isteniyorsa 42.5, 52.5 tipleri, hızlı dayanım kazanımı isteniyorsa R tipleri tercih edilmelidir. Bu tiplerin kullanımı ayrıca soğuk hava koşulları için de uygundur. Sıcak hava koşullarında ise dayanım ve süre kısıtlamaları yoksa 32,5 ve N tiplerinin kullanımı göreceli olarak yavaş hidratasyon ısısı çıkarmaları dolayısı ile daha uygun olabilir. Zararlı kimyasallar ve özellikle sülfat etkisi olan yerlerde özel amaçlı sülfatlara dayanıklı çimento (SDÇ) kullanımı gerekebilir. Genel amaçlı çimentolardan uçucu kül, tras ve yüksek fırın cürufu katkılı olanlar da sülfatlara karşı direnç sağlamaktadır (YEĞİNOBALI, 2004).

2.6. Çimentonun Kalite Kontrolünde Faktörler

Bu faktörler; kimyasal kompozisyon, silikat modülü, alümin modülü, klinker bileşimi, daha az önemli olan bileşenler, fiziksel etkenler (incelik, hidrasyon), dayanım, alçıtışı, genleşme ve kızdırma kaybıdır.

Farinin kireç standardı 100'e yaklaştıkça pişme güçleşir ama dengeli bir pişme gerçekleşir. Oran küçüldükçe pişme kolaylaşır, fakat klinker kalitesizleşir. Kireç bakımından zengin çimentolar az miktarda kireç ihtiva edenlere göre daha yüksek dayanım sağlarlar. Bu nedenle kireç miktarını olabildiğince yüksek tutmak gerekmektedir. Betonun yıpratıcı önemli hususlardan biri sülfat eriyikleri ile bazı çimento ve çimento hamuru bileşenleri arasındaki karmaşık reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan hacim genleşmeleri, çatlama ve yumuşamalarıdır. Bu zararlı etkileri önlemek için trikalsiyum alüminat (C_3A) oranı düşük çimentoların veya uygun puzolanik katkıların kullanılması önerilir. Kısmen çimento yerine katıldığında puzolan dolaylı olarak ortamdaki C_3A miktarını azaltır ve kalsiyum hidroksit (kireç) ile birleşerek gözenekleri de dolduran yeni bağlayıcı bileşenler oluşturulabilir. Genellikle çimento hamurundaki bu tür fiziksel ve kimyasal değişiklikler betonun sülfatlara olan dayanıklılığını artırmaktadır. Ancak sonuçların çimento ve puzolan türleri ile karışım oranlarına ve sülfat eriyiği katyonu ile yoğunluğuna bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır. Çimentonun kalitesi su ile karıştırıldıktan sonra bağlayıcı özelliğine ve işlevine göre değerlendirilir. Donma davranışları, mukavemet oluşumu, ısı oluşumu, hacimsel kararlılığı ve dayanıklılığı gibi etkenlere göre değerlendirilir. Hammaddelerin kimyasal bileşimleri, Kireç Doygunluk Faktörü (LSF), Silikat Modülü (SM), Alüminat Modülü (AM) kontrol altında tutularak ayarlanmaktadır. LSF faktörü alit ve belit oranından etkilenmektedir. Serbest kirecin sabit değerlerine karşılık artan LSF değeri alit miktarının artmasına neden olmaktadır. LSF değeri aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (LEA, 1970).

2.6.1. Kireç Doygunluk Faktörü (LSF)

Bir çimentonun gerçek çimento miktarının belirlenmesi için kireç standardı belirlenmiştir. Kireç standardı aşağıda verilmiştir (GÜNLÜ, 1999).

$$LSF = \frac{100.CaO}{2.8SiO_2 + 1.1Al_2O_3 + 0.7Fe_2O_3} = 90 - 98$$

2.6.2. Silikat Modülü (SM)

Sıvı fazın katı faza oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu oran 2.0-3.6 arasında olabilmektedir. SiO₂ içeriğinin artmasıyla yanma sürecinde erime yüzdesi azalmakta, fakat Al₂O₃+Fe₂O₃ içeriği artmaktadır. Yanma sürecinin ekonomik sıcaklığı silikat modülünün bir fonksiyonu olarak alınmaktadır. Silikat modülü artarsa yanma sıcaklığı artar, bu da daha az 3CaO.SiO₂ ve daha fazla serbest CaO oluşmasına neden olmaktadır. Portland çimentosu ham karışımın daha yakından sınırlandırılması için Silikat modülü geliştirilmiştir. Silikat modülü aşağıda verilmiştir.

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 1.2 - 4.0 \text{ (ortalama: 2.0-2.7)}$$

Silikat modülünün artışı klinkerin pişmesini güçleştirir. Döner fırında likit faz miktarı azalır, ancak pişme dengelidir. Çimento yavaş bağlama yaparak sertleşir. Silikat modülü azalırsa, likit faz oranı artar, klinker daha kolay pişer. Zaman geçtikçe artan dayanım sağlaması için silikat molekülünün düşük olması istenmez (GÜNLÜ, 1999).

2.6.3. Alümin Modülü (AM)

Akışkan kütle başlıca, C₃A ve ferritten, az miktarda da silis, magnezyum oksit, kireç, alkaliler, mangan v.b. den oluşmaktadır. A/F oranı ne kadar yüksekse Fe₂O₃'e oranla Al₂O₃'ün oranı da o kadar büyük olmaktadır. Akışkanın viskozitesi, bileşimi ile yakından ilgilidir. Bu oran ne kadar yüksekse belli bir sıcaklık için kütlenin viskozitesi de o kadar yüksektir. Viskoziteyi sağlamak için sıcaklığın yükseltilmesi gerekmektedir. Ayrıca ilk başta oluşan akışkan kütle miktarı A/F ye bağlı olup pişirme sürecinin ve sonuçta oluşan klinker kalitesinin üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Alümin modülü aşağıda verilmiştir.

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = 1.4 - 4.0 \text{ (ortalama: 1.4-2.5)}$$

Alümin modülü yüksek, SM oranı düşük olması sonucunda daha çabuk donan ve donma süresinin ayarlanması için yüksek miktarda alçı gerekir. AM oranı düşük ise

yavaş donma ve az büzölmeye neden olmaktadır. Fe₂O₃ miktarı artarsa ve buna bağlı olarak düşen AM ile klinkerleşme sıcaklığı düşer. Yüksek sıvı faz oluşumu gerçekleşir, klinkerleşme hızı artar. Deniz suyuna ve asidik etkilere dayanım artar. Çimentoda hidrasyon nedeni ile düşük ısı gelişimi yaşanır (GÜNLÜ, 1999).

2.6.4. Hidrolik Modülü (HM)

Hammadde karışımlarının hidrolik modülü aşağıda verilen ifade ile tanımlanır.

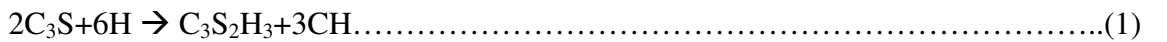
$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 1.7 - 2.4$$

İyi kalite çimentoda HM yaklaşık ikidir. HM 1,7'den küçük olan çimentolar, yeterli dayanım göstermez. Harç kolayca ufalanabilir. Bu değer 2,4'ten daha büyük ise çimento hacim sabitliği açısından kalitesiz olur. Çimento hacim genişmesi (şişme) dolayısıyla harç ve betonda parçalanıp dağılmalar olur. Klinkerin pişirilmesi daha çok enerji ister. Hidrasyon ısı yükselir ve kimyasal etkilere dayanıklılık azalır. Hidrolik modülün düşük olması serbest silis kalmasını sağlar. Böyle bir klinkerden elde edilecek çimentonun donması azalır (GÜNLÜ, 1999).

2.6.5. Çimentonun Hidrasyonu

Çimento ve suyun birleşerek kimyasal reaksiyonların oluşmasına "çimentonun hidrasyonu" denilmektedir. Çimentoların katılaşması ve sertleşmesi bu reaksiyonlar sonucunda meydana geldiğinden çimentonun hidrasyonu genellikle çimentonun su ile birleşerek sertleşmesi olayını ifade etmektedir.

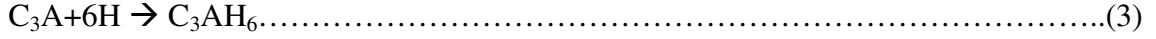
Çimentonun dört ana bileşeni tek başlarına suyla değişik şekilde reaksiyona girmektedirler. Trikalsiyum silikat, orta karar bir reaksiyon ısı vererek hidrate olmaktadır. Reaksiyon hızı, her hidrate olmuş C₃S'in üstünde oluşan kalsiyum silikat hidrat tabakasının özelliğine bağlı olarak kontrol altına alınmaktadır. Başlangıçta bu reaksiyon hızı hidrat tabakası kalınlaştıkça giderek yavaşlamaktadır. Reaksiyon (1) Denklemi ile şöyle ifade edilebilmektedir:



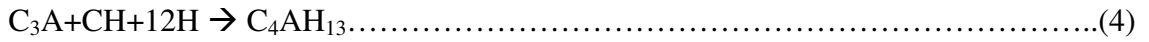
Bu reaksiyon, betonun 28 gün yaşa kadar mukavemetini kazandıran bir reaksiyondur. Dikalsiyum silikat hidrat çok daha yavaş oluşur. Bu da betonun 28 günlük ve daha sonraki son dayanımını kazandıran bir reaksiyondur (Denklem 2).



Trikalsiyum alüminat kendi başına suyla çok çabuk hidratasyona uğramakta ve aşağıdaki reaksiyon (Denklem 3) oluşmaktadır.



Kalsiyum hidroksitin hidratasyona girmesi ise daha değişik bir reaksiyonla (Denklem 4) oluşmaktadır.



Kalsiyum alüminoferrit çok daha yavaş reaksiyona girmekte ve C₃A ile birlikte betonun yapısını ve mukavemetini çok az etkilemektedir. Sertleşme çimento harcının plastik karakter veya akışkan bir kütlede sert ve şekli değiştirilmeyecek bir malzemeye dönüşmesi işlemidir. Bu işlemin süresi sıcaklık, su/çimento oranı ve çimentonun özellikleri gibi birçok etkene bağlıdır.

Sertleşme süresini tayin etmek için çoğunluğun kabul ettiği yöntem Vicat Metodu'dur. Vicat metoduna göre; donmaya başlama zamanı iğnenin tamamen harca batırılmadığı, son zamanı ise iğnenin hiç batırılmadığı duruma gelene kadar geçen süredir. Portland çimentosunun standartlarını tutturabilmesi için katılaşmaya başlama zamanı 30, 45 veya 60 dakikadan az olmaması son katılma zamanı ise 8, 10 ve 12 saatten fazla olmaması istenir. Özellikle istenmeyen donmada en önemli etken alçı taşının miktarı ve aktivitesidir. Alüminat fazının hızlı hidratasyonunu önlemek için çok az SO₃ eklenirse çabuk veya ani donma olabilir. Bu çok kısa bir reaksiyon zamanı vermesinin yanında ileri zamandaki mukavemet oluşumunu da önler. Diğer yandan dihidrat halinde çok miktarda alçı taşı bulunması halinde kalsiyum sülfat dihidratın (CaSO₄·2H₂O) çökmesiyle erken katılma olur. Buna yalancı donma denir. Elde edilen sertlik aslında sınırlıdır, materyal ileri bir karıştırma işlemi ile tekrar akışkanlaştırılabilir. Donma (sertleşme) gerekli zaman aralıklarında olan ve yalancı donmanın olmadığı çimentoda donma özellikle C₃S'in hidratasyonu nedeniyle olur ve sonuçta SO₃ bileşimindeki değişikliklerin önemi azalır. Normal donmanın olduğu çimentolarda gerekli SO₃ miktarı genellikle % 1-3 arasındadır (ÖZDEMİR, 1981).

2.6.6. Portland Çimentosunun Sertleşmesi

Portland çimentosunun reaksiyon ısısı ortalama 100 kcal/kg dır. Hidratasyon ile ortaya çıkan jel halindeki çimento taneciğinin kenarından içine doğru devam eden yeni bileşikler oluşturur. Böylece yavaş yavaş bütün harcın jel halinde katılaşması gerçekleşir. Jel halindeki yapıda tuz hidratlarının kristalleşmesi ilerler ve sertleşme tamamlanır (ÖZDEMİR, 1981).

2.6.7. Hidratasyon Isısı

Portland çimentosunun hidratasyonu ile açığa çıkan ısının hızı özellikle kütle betonlar için önemli olmaktadır. Hidratasyon ısısı betonun sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Kütle betonda (kalınlığı 60 cm veya daha kalın olanlarda), kullanılan çimentonun tipine ve ortam sıcaklığına bağlı olarak, betonun sıcaklığı 2-5 gün içerisinde 50 °C'ye kadar yükselbilmektedir (RAMACHANDRAN V., 1995). Sıcaklık artışı genleşmeye yol açmaktadır. Ancak, daha sonraki günlerde, beton sıcaklığı dışarıdaki hava sıcaklığının seviyesine düşmekte ve bunun sonucunda betonda büzülme ve çatlaklar oluşmaktadır.

Klinker minerallerinin hidratasyonu portland çimentosunda bir ısı açığa çıkmasına neden olur. C₃S ve C₃A fazlarının hidratasyon hızları ve birleşmeleri çok yüksek olduğundan ve yüksek bir özgül ısı oluşturduklarından ısı oluşumunda ilk sırayı tutarlar. Pratikte hidratasyon ısısı önemli bir etken olabilir. Soğuk havada beton yaparken faydalı olabilir veya kütle betonu yaparken sorun yaratabilir. Diğer kullanımlarda genelde düşük ısıda özel çimentolar kullanılır. Bunlar çok az C₃A ve indirgenmiş miktarda C₃S içeren klinkerlerle elde edilir.

Bir seçenek olarak puzolanlar ile karıştırılmış portland klinkeri kullanılabilir. Birçok ülkenin düşük ısılı çimento standartları vardır. Bu standartlar genellikle 7 ve 28 günlük ısıları belirtirler. Hidratasyon ısılarının maksimum limitleri verilebildiği gibi bu ısı miktarları kimyasal bileşikler cinsinden de verilebilir. Geri kalanlar için değişik yollar uygulanabilir. Bütün yöntemlerde asıl amaç, düşük bir C₃A miktarı ve mümkün olduğu kadar az bir C₃S bileşimli çimentodur (ÖZDEMİR, 1981).

2.6.8. Dayanım

Portland çimentosunun en önemli özelliği mukavemetini oluşturan karakteristikleridir. Bu özellik birçok etkene bağlıdır. Buna karışım özellikleri, sıcaklık, nem durumu, kalıbın boyutları ve şekli gibi örnekler verilebilir. Bu nedenle mukavemetin tayini için standartlaştırılmış bir metot kullanmak gerekir. Mukavemet ölçümlerinde kullanılan en uygun metotlar, ASTM, BS ve ISO metotlarıdır. Bu yöntemler son yıllarda birçok ülke tarafından benimsenmiştir.

Testten önce seçilen sertleşme zaman aralıkları genellikle 1, 3, 7 ve 28 gün arasındadır. Her ülkenin belirlediği özelliklere göre değişmektedir. Çimento üreticisini ilgilendiren en önemli konu özel çimento kategorileri belirlenen alt ve üst mukavemet sınırlar içinde üretimi temin edebilmek ve mukavemet özelliklerinin değişimini minimuma indirmektedir. Bu hammadde karakteristiklerinin ve süreç parametrelerinin sürekli denetimini gerektirir.

İnşaat kalitesi açısından, betonun dayanıklılığı en önemli unsurdur. Beton bileşimi, yapı karakteri ve çevre koşulları gibi faktörlere bağlıdır. Fakat çimentonun karakteri, dayanıklılık üzerine doğrudan etki eder. Özellikle sülfat içeren sular gibi kimyasal olayların etkin olduğu yerlerde kullanılacak çimentoların, bu etkilere direnç gösteren ve betona zarar veren reaksiyonları önleyecek özellikte olması beklenir (ÖZDEMİR, 1981).

2.6.9. Klinker Bileşimi ve Etkisi

Klinker minerallerinin C_2S , C_3S , C_3A ve C_4AF bağıl miktarları mukavemet özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bütün bu fazlar mukavemet gelişimine katkıda bulunurlar. Bu faktörlerin erken mukavemet gelişimi (28 güne kadar) C_3S ve C_3A 'nın hızlı hidrasyonuna uğrayan fazına doğrudan bağlıdır. C_2S ve C_4AF daha yavaş hidrasyona uğradığı için genelde geç mukavemet oluşumuna neden olur.

Daha az önemli olan bileşenler; klinker minerallerinin bağıl miktarlarını değiştirebilir. Bu nedenle mukavemet gelişimini etkiler. Ortamda en önemlisi çözünebilir alkalilerin (genellikle sülfatlar) % 0-1.5 arasında değişen varlığıdır. Bunlar, 1-3 gün arasında erken mukavemeti artırır fakat 7 gün ve sonrasındaki mukavemeti azaltırlar. Bileşime girmemiş CaO 'in klinker içinde genellikle bulunan miktarının

çimentonun mukavemet gelişimi üzerine doğrudan etki yaptığı düşünülmemektedir. Fakat yüksek miktarı, klinkerin tam pişmediğini belirtir. Düşük C_3S bileşiminin yanında daha çok miktarda alkali ile birleşebilir. Klinker minerallerinin bağlı miktarları mukavemet değerine etkileyen en önemli faktörlerdir.

Tüm fazlar mukavemet gelişimine katkıda bulunurlar. Erken mukavemet gelişimi 28 güne kadar C_3S ve C_3A 'nın hızlı hidrasyona uğrayan fazına doğrudan bağlıdır. C_2S ve C_4AF daha yavaş hidrasyona uğradığı için genelde geç mukavemet oluşumuna etki eder. Klinker içinde ilk 28 günde mukavemet gelişimini etkileyen önemli bileşenler C_3S , C_3A ve çözünebilir alkalilerdir (ÖZDEMİR, 1981).

2.6.10. Alçıtaşı Bileşimi ve Etkisi

Alçıtaşı $Ca(SO)_4 \cdot 2H_2O$ içerikli bir malzemedir ve çimentoya erken katılaşmayı önlemek için katılır. Fakat aynı zamanda mukavemet gelişimini gözle görülür bir şekilde etkiler. Bu optimum değer yaşla artar ve standart limitlerinin üstüne de çıkabilir. Erken yaşın optimum miktarı uygun geciktirmeyi sağlayan SO_3 miktarı ile yakından ilgilidir. Bu nedenle C_3A 'nın miktarı ve aktivitesi çözünebilir alkalilerin miktarı, çimentonun inceliği ve SO_3 aktivitesi gibi etkenler tarafından etkilenir. Uygun SO_3 optimizasyonu yapılması genellikle iyi olur. Çünkü optimum değerden % 1'lik sapma mukavemet üzerinde bir düşüşe sebep olabilir. Öğütme sırasında su alma işleminin artırılması, mukavemet artışı yönünden faydalıdır. Buna karşılık yalancı donma olasılığı da artmaktadır. Alçıtaşındaki safsızlıklar mukavemet oluşumunu bozabilir. Bundan dolayı alçıtaşı kullanımı sırasında özel bir dikkat göstermek gerekmektedir (ÖZDEMİR, 1981).

2.6.11. İncelik (Blaine İnceliği)

Çimento mukavemetini etkileyen diğer bir faktör ise çimento inceliğidir. Bu faktör çimento mukavemetini istenilen düzeye ayarlamak için kullanılır. Çimento inceliği genelde etkin yüzey ile tanımlanır. Bu etkin yüzey (blaine) değeri hava geçirgenlik metodu ile saptanır. Birçok çimentolar 2800-4500 cm^2/g Blaine inceliğinde ayarlanır. SO_3 optimizasyonu ayarlanmış bir çimentoda çimento mukavemeti incelik değerlerine yapılacak müdahalelerle istenilen değerlere çekilebilir. 100 Blaine değerindeki bir artış

0.5-1 MPa bir değer artışına neden olmaktadır. Öncelikle yaş arttıķa etki azalma eğilimi gösterir. Blaine, incelik ve mukavemet arasındaki bu ilişki tanecik büyüklük dağılımını sabit alındığında geçerlidir (ÖZDEMİR, 1981).

Çimento taneleri 5 mikron ile 90 mikron arasında değişen çaplara sahiptir. Çoğunluk 30 mikron civarındadır. Çimento hidratasyonu dıştan merkeze doğru gelişir ve 90 günde %95 oranında tamamlanır. Bu süre zarfında ancak 5,2 mikronluk bir kısmın hidrate olduğu gözlenmiştir. Yani çapı 10 mikron olan tane tümüyle hidrate olur, çap daha büyükse orta kısım hidratlanmadan kalır, yani sertleşmez ve istenilen mukavemet sağlanmaz. şu halde yüksek mukavemetli bir çimento da taneler çok ince öğütülmelidir.

İnceliğin mukavemet dışında da etkileri vardır. Bunları şöylece sıralayabiliriz:

1. Çimentoyu ıslatmak için gereken su artar.
2. Çimentonun beton içindeki dağılımını kolaylaşır.
3. Fiziko-kimyasal bir olay olan ilk ıslanma, taneler incelidikçe daha büyük bir ısı çıkararak oluşur (AKMAN, 1987).

2.6.12. Kızdırma Kaybı

Klinker minerallerinin ön hidratasyonu oluşabilir. Ağırlığı bilinen çimento numunesinin çok yüksek sıcaklıkta kızdırılması sonunda meydana gelen ağırlık kaybına çimentonun kızdırma kaybı denir. Kızdırma kaybı sınır değerler üzerinde ise mukavemet gelişim karakteristiklerini bozabilir. Bu değer, çimentonun içeriği ile değişmekte ancak büyüklük olarak % 0.3 civarındadır. Kızdırma kaybı iyi korunamayarak uygun olmayan koşullarda saklandığına veya çok uzun süre bekletilmiş olduğuna ve bu sebeple bir miktar karbonatlaşma ve zamanından önce hidratasyon yapıp yapmadığına işaret eder (ÖZDEMİR, 1981).

2.6.13. Çimentoların Genleşmesine Neden Olan Reaksiyonlar

Etrenjitin C_3A ve SO_3 'ten oluşumu, zor pişmiş serbest CaO 'nun hidratasyonu, kristal MgO 'nun hidratasyonudur. Çok genleşmenin sorun yaratmaması için çimento standartlarında kimyasal performans koşulları ve istenilen testler belirlenmiştir. Kimyasal koşullar genellikle MgO için %4-6 ve SO_3 için %2.5-4.5 arasındadır.

Genellikle SO_3 miktarı C_3A miktarının bir fonksiyonu olarak veya çimento inceliğinin izin verdiği ölçülerde verilir (ÖZDEMİR, 1981).

2.6.14. Sülfat Direnci

Sülfatlı çözeltilerin çimento esaslı harç ve beton üzerindeki olumsuz etkilerinin ortaya çıkarılması yıllar alabilir. Bu bakımdan çimento ve katkı maddelerinin sülfat dirençlerini değerlendirebilmek için bu konuda kısa sürede sonuç alınabilecek deney yöntemlerine gereksinim vardır. Sülfat çözeltilerinin çimento hamuru üzerindeki yıpratıcı etkisi sülfat yoğunluğu ile birlikte artar ve yoğunluğa bağlı olarak korozyon mekanizması da farklılık gösterebilir. Burada S/B oranı önemli rol oynamaktadır. Optimum S/B oranı ile harç porozitesi ve puzolan katkısıyla kalsiyum hidroksit miktarındaki azalma, oluşacak hidratların daha fazla alüminyum bağlayarak oluşabilecek etrenjit miktarını azaltması, çözeltilerin harç ve beton içine nüfuz etmelerini yavaşlatır. Bu nedenle çimento hamurlarının $NaSO_4$ ve $MgSO_4$ içinde dayanımına ilişkin çalışmalar yapılmıştır.

Portland çimento harcında bulunan hidratlar $Ca(OH)_2$ ve kalsiyum alüminat hidratlarıdır. Özellikle kalsiyum alüminat, materyalin içine giren sülfat iyonlarıyla reaksiyona girmeye hazırdır. Sonuçta, etrenjit formasyonu betonun aşamalı parçalanmasına neden olur.

Deniz suyu sülfatlı kaynak suları veya atık sularla karşılaşabilecek betonlarda kullanılacak çimentonun az C_3A 'lı olması gerekir. Özel sülfat dirençli çimentolar bu kullanımlar için üretilir. Bu çimentolardaki maksimum C_3A miktarının %3-5 arasında olması istenir. Sülfat direnci göz önüne alındığında çimentolar puzolan katkılı çimentolar, normal portland çimentosuna göre daha iyidir (ÖZDEMİR, 1981).

2.6.15. Daha Az Önemli Olan Bileşenler

Klinker mukavemetini değiştirebilecek en önemli etken ortamda çözünebilir alkalilerin (genelde sülfatlar) değişen miktarlarıdır. Bunlar 1-3 gün içerisinde erken mukavemeti artırırken 7 gün ve sonraki mukavemeti düşürürler. 33 klinker üretim tesisinde yapılmış olan, %4 alçı içerikli çimentoya 30 MPa basınç uygulanması sonucu klinker mukavemetini etkileyen en önemli faktörün çözünebilir alkaliler olduğu

görülmüştür. 28 günlük mukavemet değeri için bulunan ampirik formül aşağıda verilmiştir.

$$C_3S_{28} = 52 - 10xKs + 0.15xC_3S$$

Bu ifade de çözünebilir alkalilerin (Ks) bileşimi klinkerdeki toplam alkalilerin ve SO₃'ün bileşimine bağlıdır. Direkt olarak ölçülür veya klinker içindeki SO₃ ve alkalilerin toplamından hesaplanır. Serbest CaO'in klinker içinde genellikle bulunan miktarının çimentonun mukavemet gelişimi üzerine etkisinin olmadığı düşünülmektedir. Ancak yüksek değeri klinkerin tam olarak pişmediğini göstermektedir (ÖZDEMİR, 1981).

2.7. Çimentolarda Sülfat Etkisi

Sülfatlı ortamlar beton ve betonarme yapıların dürabilitesini olumsuz yönde etkileyen dış etkenlerden biri olup, bu konu ile ilgili pek çok araştırma yapılmıştır ve tartışmalar devam etmektedir. Sülfat etkisi, sülfat iyonları ile çimento hidrasyon ürünleri arasında meydana gelen ve beton içerisinde hacim genişlemesine neden olarak betonun stabilitesini bozan (Na₂SO₄ çözeltisi) veya sertleşmiş çimento hamurunun yumuşamasına neden olan (MgSO₄ çözeltisi) bir seri karmaşık kimyasal reaksiyonlar zinciri olarak tanımlanabilir. Sülfat iyonları beton içerisine dışarıdan nüfuz edebileceği gibi sülfatın kaynağı, üretimde kullanılan çimento, agrega, kimyasal ve mineral katkı maddeleri ya da karışım suyu olabilir. Sodyum sülfatlı ortamlarda bulunan betonlardaki hasarın meydana gelmesi, trikalsiyum alüminatın (C₃A) hidrasyon sonucunda oluşan kalsiyum alüminyum hidrat (C-A-H) ile sülfat iyonlarının oluşturduğu kimyasal reaksiyon sonucunda meydana gelen etrenjit oluşumudur. Diğer taraftan, magnezyum sülfatlı ortamlarda ise sertleşme olduktan sonra etrenjit oluşumu devam etmez. Fakat sertleşmiş çimento hamurunun esasını oluşturan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelinin magnezyum ve sülfat iyonları ile reaksiyonu sonucu silika jeli ortaya çıkar. Bu iki ürün arasındaki reaksiyon sonucunda oluşan magnezyum silikat hidratın (M-S-H) dayanım özelliği olmayıp, C-S-H jelinin bozulmasına neden olur. Dolayısıyla, dış sülfat etkisine maruz betonlarda reaksiyonun oluşabilmesi, betonun fiziksel ve hidrasyon ürünlerinin kimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu durumda, uygun çimento seçiminin yapılması ve bunun yanında malzemenin geçirimsizlik özelliğini düşürecek yeterli dozaj ve işlenebilmeye sahip düşük su-çimento oranlı betonların üretilebilmesi sülfat etkisinin

oluşturacağı hasarı minimuma indirebilmek için yeterli olacaktır (ATAHAN ve ark, 2003).

Harçlarda ve betonlarda dayanım, bağlayıcı malzemenin yapacağı reaksiyonlar ile maruz kalacakları sülfatların, tuzların konsantrasyonuna, dış koşullara ve zamana bağlıdır. Bir çözeltide SO_4 iyonlarının hidrate çimento hamuruna nüfuzu, doymuş kireç çözeltisinden daha fazladır. Bu durum çimento hamurlarının yarı geçirgen bir malzeme gibi davrandığını gösterir (USHIYAMA, GOTO, 1974).

Sülfat etkisi genelde kalsiyum alüminatlar üzerine yoğunlaşır. C_3A bakımından zengin olan çimentoların zayıf olanlara göre daha fazla sülfatlara dayanıklı olduğu konusunda görüşler vardır (SCHRAMLI, 1979).

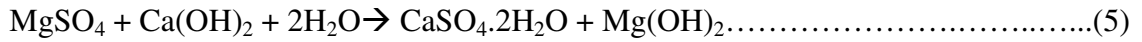
Çimentoda bulunan alüminat, kireçle birleşerek trikalsiyum alüminat hidrateyi ($Al_2O_3CaO.6H_2O$) meydana getirir. Alüminat hidrate üzerinde sülfatların ($CaSO_4.2H_2O$) etkisiyle etrenjit adı verilen sülfat alüminat tuzu ($Al_2O_3.3CaSO_4.30H_2O$) oluşur. Etrenjit içindeki 30 molekül su önemli bir hacim artışına neden olduğu gibi hacim artışının etkisiyle oluşan iç gerilmeler çimentonun dayanıklılığını azaltır ve reaksiyonunu yavaşlatır. Bir çimentonun reaksiyon esnasında bünyesinde C_3A ve $CaSO_4.2H_2O$ ne kadar fazla olursa o kadar fazla etrenjit meydana gelir. Bu nedenle sülfatlı sulara dayanıklı olması istenen bir çimentoda, C_3A ve C_3S 'nin sınırlandırılması istenir. Bu konuda ASTM standardı şu koşulların sağlanmasını öngörmektedir: C_3A (miktarı) + C_3S (miktarı) < %58; C_3A (miktarı) < %8. Su içerisinde çözülmüş halde bulunan sülfatın miktarı ile suyun hareketli veya durgun olması ayrıca önemlidir. Genelde bir litre suda 0.21 gr.dan fazla çözülmüş sülfat varsa, zararlı etki başlamış kabul edilir. Bataklık gibi yerlerdeki sularda ise sülfat miktarı sınırı litrede 225 mg'dır. Durgun sularda yenileşme hareketli sulardan az olduğu için zararlı etki daha az olacaktır. Sularda gr/lt olarak bulunabilecek sülfat miktarı 0.10' a kadar ise pratik olarak bir etkiye yok demektir. Bu miktar 0.15-1.00 ise etkiye var, 1.00-2.00 ise etkimenin önemli olduğu, fakat 2.00'dan fazla ise şiddetli olduğu anlaşılabilir. Bu değerler durgun sularda %50 artırılarak kullanılır. $CaSO_4$, Na_2SO_4 ve K_2SO_4 gibi sülfatlar için verilen bu değerler $MgSO_4$ için yarısı alınarak uygulanabilir. Zira $MgSO_4$ 'ün zararlı etkisi diğerlerinden iki kat fazladır. (NEVILLE, 1977; OYMAEL, 1995).

Schramli ve Neville'nin C_3A ve $CaSO_4.2H_2O$ miktarlar ilişkisi çelişir görülmektedir.

Cüruflu çimentoların deniz suyu etkisine karşı yüksek performansı yıllardır bilinmektedir. Yapılan deneylerde yüksek fırın cürufu miktarı artırılmış çimentoların deniz suyu etkisiyle genişmelerinin azaldığı saptanmıştır (TOKYAY, 2003).

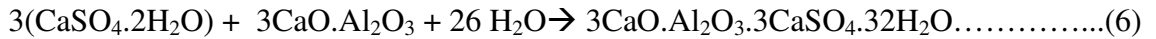
2.7.1. Magnezyum Sülfatın Çimentolarda Etkileri

Magnezyum sülfat, taze harçlarda ilk olarak çözeltideki Ca(OH)_2 ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon (5) denkleminde gösterilmiştir.



Bu reaksiyonda oluşan Mg(OH)_2 brusit olarak adlandırılır. Brusitin çözünürlüğü çok düşüktür. Ayrıca brusit oluşumu yüksek oranda kalsiyum hidroksit tüketimini sağlar. Bu da çözeltinin pH'ını düşürür.

Ayrıca taze harçlarda yukarıdaki reaksiyonda oluşan $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (alçıtaşı) hidrate olmamış kalsiyum alüminat ile reaksiyona girer ve (6) denklemindeki reaksiyon sonucunda $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (etrenjit) oluşur. Oluşan bu etrenjit zararsızdır. Çünkü taze harçta oluştuğundan dolayı sadece taze harcın hacminin artmasına neden olur.



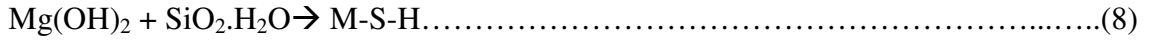
Magnezyum sülfat çözeltili harçlarda sertleşme olduktan sonra alçıtaşı oluşumu devam eder ve alçıtaşı oluşumunun artması şişmeye neden olarak ilk zararlı etkiyi meydana getirir. Öte yanda magnezyum sülfat çözeltili harçlarda sertleşme olduktan sonra etrenjit oluşumu devam etmez. Çünkü brusit oluşumu ve çözeltinin pH değerinin düşük olması hem etrenjit hem de C-S-H (kalsiyum silika hidratın) stabilitesini bozar.

Bilindiği üzere C-S-H yapısı, çimento hamurunun ana bağlayıcı özelliği olan önemli bir bileşendir. Magnezyum ve kalsiyum iyonlarının valans değerlerinin aynı ve iyonik yarıçaplarının yakın olmasından dolayı magnezyum sülfat, C-S-H jeli ile aşağıdaki (7) denkleminde verilen reaksiyonu oluşturur.



Burada oluşan $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ silika jelidir ve bu jelin bağlayıcı ve dayanım özelliği C-S-H jelinin bağlayıcı ve dayanım özelliğine göre çok düşüktür. Çimento hamurunda alçıtaşının ve brusitin konsantrasyonu artarken C-S-H gittikçe kirecini kaybeder ve bağlayıcı özelliği azalır. Brusit konsantrasyonunun artmasıyla beraber brusit, silika jeli ile (8) denkleminde göre reaksiyona girer ve bunun sonucunda bağlayıcı ve dayanım

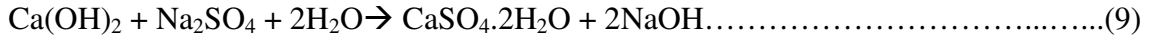
özelliği olmayan M-S-H (magnezyum silika hidrat) oluşur. Brusit M-S-H ye dönüştükçe oranı da gittikçe azalır.



Sonuç olarak bu oluşum sertleşmiş çimento hamurunun yumuşamasına ve bozulmasına neden olur (KILINÇ ve UYAN, 2003).

2.7.2. Sodyum Sülfatın Çimentolarda Etkileri

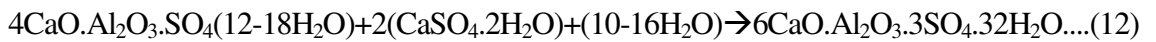
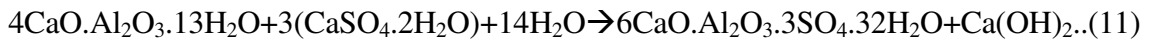
Sodyum sülfat, taze harçlarda magnezyum sülfattaki gibi aynı şekilde ilk olarak Ca(OH)_2 ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon (9) denkleminde verilmiştir.



Reaksiyonda oluşan NaOH (sodyum hidroksit) çimento hamurunun pH değerini yükseltir. Ayrıca taze harçlarda yukarıdaki oluşan $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (alçıtaşı) hidrate olmamış kalsiyum alüminat ile (10) denklemindeki gibi reaksiyona girer ve bu reaksiyon sonucunda $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (ilk etrenjit) oluşur. Oluşan bu etrenjit zararsızdır. Çünkü taze harçta oluştuğundan dolayı sadece taze harcın hacminin artmasına neden olur.



Sodyum sülfat çözeltili harçlarda da magnezyum çözeltili harçlarda olduğu gibi sertleşme olduktan sonra alçıtaşı oluşumu devam eder ve alçıtaşı oluşumunun artması şişmeye neden olarak ilk zararlı etkiyi meydana getirir. Diğer taraftan sertleşmiş harçlarda oluşan alçıtaşı, hidrate kalsiyum alüminatlarla, hidrate kalsiyum sülfalüminatlarla veya anhidr trikalsiyum alüminatlarla reaksiyona girerek denklemlere göre sertleşme başlangıcından itibaren etrenjit oluşur. Söz konusu reaksiyon gelişimi denklem (11), (12) ve (13)'te verilmiştir.



Oluşan bu etrenjit harçta şişme ve çatlamalara sebep olarak bozulma ve dayanım kaybına neden olur. Sodyum sülfatın etki mekanizması temel olarak sertleştikten sonraki etrenjit oluşumu üzerinde odaklanır. Bu yüzden çimentolarda C_3A oranını sınırlamak gerekir (KILINÇ ve UYAN, 2003).

2.8. PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 Çimentolarla Yapılan Harçların Fiziksel ve Kimyasal Olarak İncelemeleri

Sülfatlı çözeltilerin çimento esaslı harç ve beton üzerindeki olumsuz etkilerinin ortaya çıkması yıllar alabilir. Bu bakımdan çimento ve katkı maddelerinin sülfat dirençlerini değerlendirebilmek için bu konuda kısa sürede sonuç alınabilecek deney yöntemlerine gereksinim vardır. Sülfat çözeltilerinin çimento hamuru üzerindeki yıpratıcı etkisi sülfat yoğunluğu ile birlikte artar ve yoğunluğa bağlı olarak korozyon mekanizması da farklılık gösterebilir (OYMAEL, 1995).

Dış sülfat etkisine maruz betonlarda reaksiyonun oluşabilmesi, betonun fiziksel(geçirimlilik) ve hidrasyon ürünlerinin kimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu durumda, uygun çimento seçiminin yapılması ve bunun yanında malzemenin geçirimlilik özelliğini düşürecek yeterli dozaj ve işlenebilmeye sahip düşük su-çimento oranlı betonların üretilebilmesi sülfat etkisinin oluşturacağı hasarı minimuma indirebilmek için yeterli olacaktır (ATAHAN ve ark., 2003).

Bu amaçla, hazırlanan çimento harçlarının su ve bazı sülfatlar içinde dayanımına ilişkin deneysel çalışmalar yer almaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Yöntem

Bu çalışmada % miktarı üzerinden hazırlanan $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 'lü çözeltilere standart harç numuneleri konarak 14 ve 28 gün sonunda dayanım performansları bulunmuştur. Söz konusu basınç dayanımlarındaki değişimler iç yapıya yönelik SEM (Scanning electron mikroskop) ve XRD (X-Ray Diffraction) analizleri ile desteklenmiştir.

Deneysel çalışmalar, M.K.Ü Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Laboratuvarı ile İskenderun OYSA Çimento Fabrikası, Ankara Çimento Müstahsilleri Birliği AR-GE Laboratuvarlarında yapılmıştır.

Bu çalışmanın orijinal yönü; prizini alan harç numunelerinin 24 saat sonra çözeltiler içine konulmasıdır.

3.2. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

3.2.1. Çimentolar

Deneylerde OYSA İskenderun Çimento Fabrikası'ndan temin edilen PÇ 42,5 (TS EN 197-1) portland çimentosu ile Adıyaman Çimento Fabrikası'nda üretilen PKÇ/B 32,5 (TS 12143) çimentosu kullanılmıştır. Söz konusu çimentolara ilişkin fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Portland çimentolarının analizleri (YEĞİNOBALI, SOBOLEV, SOBOLEVA, KIYICI, 1997)

KİMYASAL ANALİZLER

Kimyasal Özellikler (%)		İskenderun çimento PÇ 42,5 (Literatür *)	Adıyaman Çimento PKÇ 32,5
CaO		62.84 (62.97)	52.01
SiO ₂	Lim. S+A+F≥%70	18.80 (19.80)	24.23
Al ₂ O ₃		5.21 (5.61)	5.11
Fe ₂ O ₃		2.59 (3.42)	5.25
MgO (Lim.≤%5)		1.37 (1.81)	3.33
SO ₃ (Lim.≤%3.5)		2.58 (2.86)	2.28
Çözünmeyen Kalıntı(Lim.≤%5)		0.72 (0.36)	-
Klorür Cl ⁻ (Lim.≤%0.10)		0.020	-
Kızdırma Kaybı (Lim.≤%5)		2.80	-

BOGUE BİLEŞİMİ

C ₃ S	66.89 (51.32)	20.74
C ₂ S	3.44 (19.25)	53.85
C ₃ A	9.41 (10.12)	4.66
C ₄ AF	7.88 (9.89)	15.98

FİZİKSEL ANALİZLER

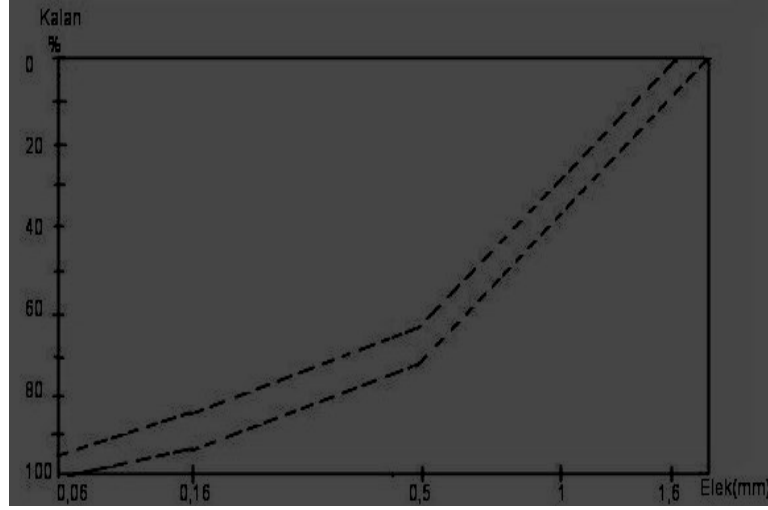
Özgül Ağırlık g/cm ³		3.10 (3.15)	-
Özgül Yüzey cm ² /g (Lim.≥3000)		3980 (3410)	3750
Normal Kıvam Su (%)		29.4	26.0
Priz (dk)	Başlama (dk)	145 (130)	-
	Bitiş (dk)	185 (160)	-
Le Chatelier (mm)		2	-

DAYANIMLAR

Basınç (N/mm ²)	7 gün	39.8 (39.9)	26.7
	28 gün	49.5 (46.4)	38.4

3.2.2. Standart Kum

Araştırmada yer alan harç karışımlarının tümünde TS 819'a uygun (Rilem Chembereau) Pınarhisar Çimento Fabrikası standart kumu kullanılmıştır. Söz konusu kumun granülometrik eğrisi Şekil 3.1 de verilmiştir (TS 819, 1989).



Şekil 3.1. Standart kumun granülometrik eğrisi (TS 819, 1989)

3.2.3. Sülfatlar ve Çözeltiler

Bu çalışmada sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltileri kullanılmıştır. Bu karışımlar her bir harç numunesi için (PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5) %0, %5 ve %10'luk konsantrasyonda çözeltiler hazırlandı. Çözeltiler, konulacakları kabın darası alındıktan sonra kaba konulan su miktarının %0, %5 ve %10 u kadar sülfat katılarak hazırlanmıştır. Çözeltilerin üzerleri buharlaşmayı önlemek için cam levha ile kapalı tutulmuştur. Çözeltilerin kristalleşmemesi ve çökmemesi için haftada iki defa karıştırılmasına dikkat edilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Basınç Dayanım Analizleri

Dayanım deneyine esas olmak üzere hazırlanan harç numuneleri 40x40x160 mm.lik üçer adet (toplam 60 adet) prizmatik harç numuneler alınarak kontrol için su ve %5 ve %10'luk MgSO₄ ve Na₂SO₄'lü ortamda her bir ortam için ayrı ayrı 14 ve 28 gün süreyle bekletilmişlerdir. Tüm harç karışımlarında S/Ç oranı 0.50 sabit alınmıştır. Deneye esas olan numuneler 20 °C'lik oda sıcaklığında kalıplandıktan 24 saat sonra 14 ve 28 gün süre ile yüksekliğinin ½'sine kadar doldurulmuş su kapları içinde kür edilmişlerdir.

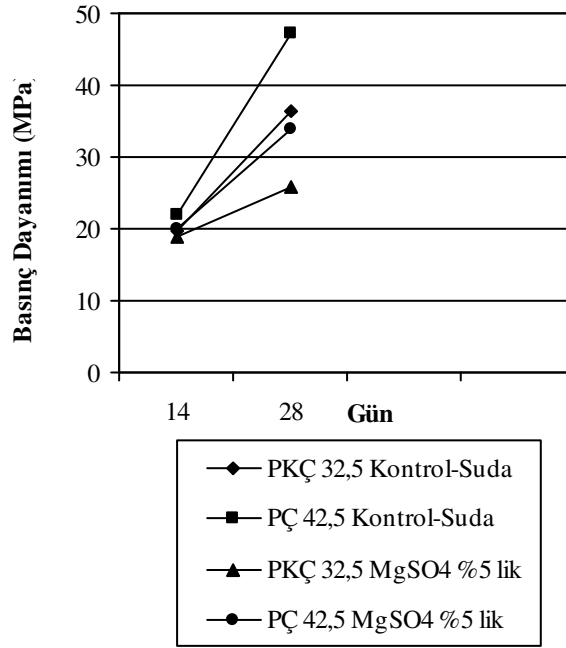
Kür süreleri sonunda çıkarılan bu numuneler basınç testine tabi tutularak bu numunelere ilişkin değerler tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. 40x40x160 mm.lik numunelerin basınç dayanım değerleri

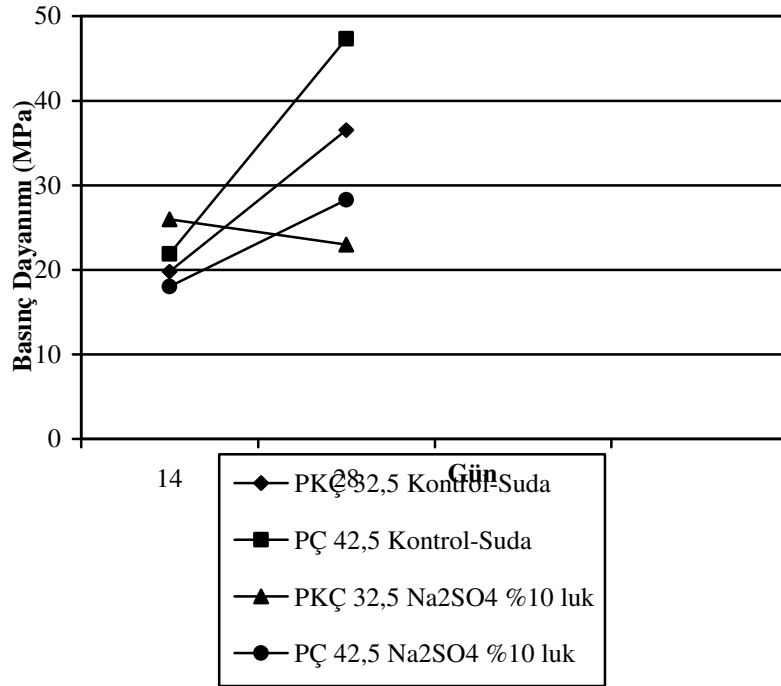
	14 Günlük(N/mm ²)	28 Günlük(N/mm ²)
PKÇ 32,5 Kontrol	19.8	36.5
PKÇ 32,5 MgSO ₄ %5'lik	21.9	47.3
PKÇ 32,5 Na ₂ SO ₄ %5'lik	18.8	25.7
PKÇ 32,5 MgSO ₄ %10'luk	20.0	34.0
PKÇ 32,5 Na ₂ SO ₄ %10'luk	19	27.5
PÇ 42,5 Kontrol	21.0	33.6
PÇ 42,5 MgSO ₄ %5'lik	13.3	21.0
PÇ 42,5 Na ₂ SO ₄ %5'lik	15.0	26.0
PÇ 42,5 MgSO ₄ %10'luk	26.0	23.0
PÇ 42,5 Na ₂ SO ₄ %10'luk	18.0	28.3

Not: Tablodaki değerler deneysel doğrulanarak kullanılmalıdır.

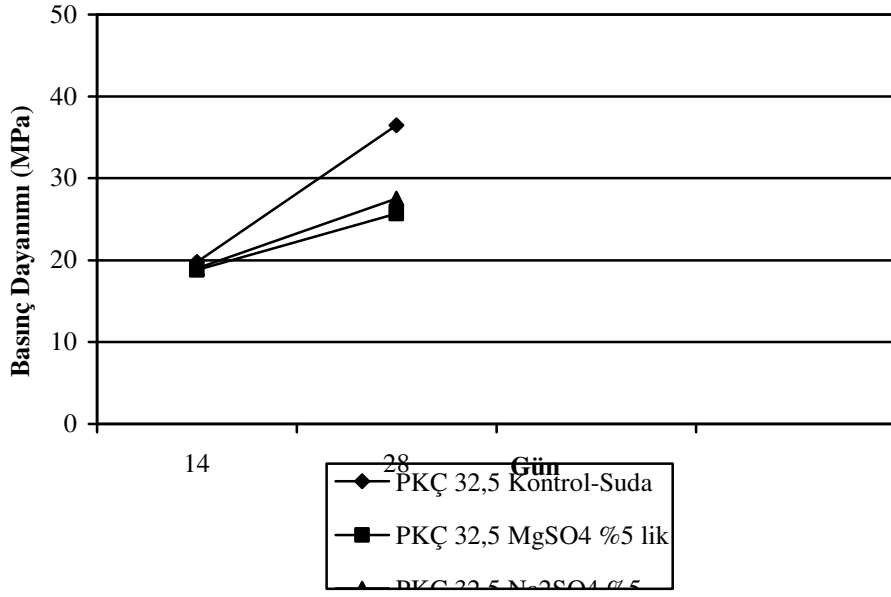
Elde edilen basınç dayanımı değerleri aşağıda karşılaştırılmalı olarak grafik şeklinde gösterilmiştir.



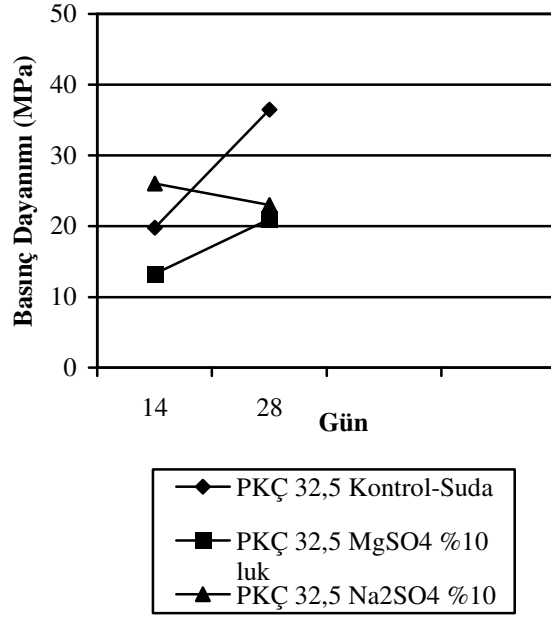
Şekil 4.1. %5'lik MgSO₄ ve Na₂SO₄ ortamlarında basınç dayanımları



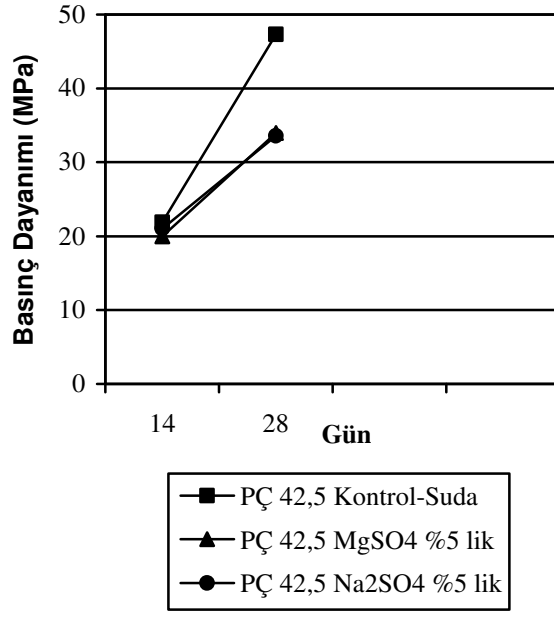
Şekil 4.2. %10'luk MgSO₄ ve Na₂SO₄ ortamlarında basınç dayanımları



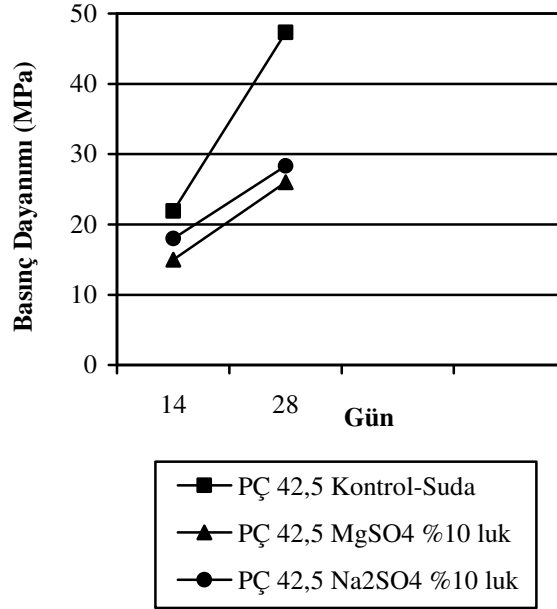
Şekil 4.3. PKÇ 32,5 çimentosunun %5'lik MgSO₄ ve Na₂SO₄ ortamlarında basınç dayanım değişmesi



Şekil 4.4. PKÇ 32,5 çimentosunun %10'luk MgSO₄ ve Na₂SO₄ ortamlarında basınç dayanım değişmesi



Şekil 4.5. PÇ 42,5 çimentosunun %5'lik MgSO₄ ve Na₂SO₄ ortamlarında basınç dayanım değişmesi



Şekil 4.6. PÇ 42,5 çimentosunun %10'luk MgSO₄ ve Na₂SO₄ ortamlarında basınç dayanım değişmesi

4.2. Kimyasal Analizler

Her bir numune için OYSA İskenderun Çimento Fabrikasında yaptırılan kimyasal analizler sonucu elde edilen değerler Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. PKÇ 32,5 Çimentosunun Çözelti Süreleri Sonucu Kimyasal Analizleri
(OYSA Çimento Fabrikası, Rapor, 30.03.2005)

Kimyasal Özellikler	Kontrol (Suda)	MgSO ₄ İçinde		Na ₂ SO ₄ İçinde	
		%5’lik	%10’luk	%5’lik	%10’luk
MgO	1.89	2.52	2.73	1.62	1.65
Al ₂ O ₃	3.32	2.95	3.39	3.09	3.12
SiO ₂	39.42	41.23	34.09	40.30	34.61
SO ₃	1.17	1.53	2.34	1.96	2.43
K ₂ O	0.14	0.09	0.08	0.11	0.08
CaO	31.41	29.34	33.62	29.91	32.15
Fe ₂ O ₃	3.74	3.63	4.30	3.69	3.93

Tablo 4.3. PÇ 42,5 Çimentosunun Çözelti Süreleri Sonucu Kimyasal Analizleri
(OYSA Çimento Fabrikası, Rapor, 30.03.2005)

Kimyasal Özellikler	Kontrol (Suda)	MgSO ₄ İçinde		Na ₂ SO ₄ İçinde	
		%5’lik	%10’luk	%5’lik	%10’luk
MgO	0.47	1.75	1.47	0.45	0.50
Al ₂ O ₃	2.93	3.14	2.90	2.80	2.75
SiO ₂	31.43	29.48	34.45	36.36	30.26
SO ₃	1.09	2.05	2.00	1.66	2.36
K ₂ O	0.19	0.26	0.24	0.24	0.22
CaO	39.34	38.06	36.93	35.90	39.58
Fe ₂ O ₃	2.03	2.04	2.00	1.97	2.07

PKÇ 32,5 çimentolu harçların %5’lik Na₂SO₄ ve MgSO₄’lü ortamlarda 14 ve 28 günlük bekletilmeleri sonucu;

PKÇ 32,5 çimentolu harçların 14 ve 28 günde kontrol numunesinin 19,8 N/mm²’lik dayanımı karşısında Na₂SO₄ çözeltisi içinde %0,8 kadar dayanım kaybettiği, MgSO₄ çözeltisi içinde ise %1 kadar dayanım kaybettiği anlaşılmıştır. Bekleme süresinin 28 güne çıkması sonucu kontrol numunesinin 36,5 N/mm²’lik dayanımı karşısında Na₂SO₄ çözeltisinde %9 kadar, MgSO₄ çözeltisinde %11 kadar dayanım kaybettiği görülmektedir.

PKÇ 32,5 çimentolu numunelerin %10’luk çözeltiler içinde bekletilmeleri sonucu %5’lik çözeltideki numunelere göre daha fazla yıpranma olmuştur.

PÇ 42,5 çimentolarla üretilen harç numunelerinin 14 günde %5'lik Na₂SO₄ çözeltisi içinde kontrol numunesine göre %1 dayanım azalması gözlenirken %5'lik MgSO₄ çözeltisindekilerde %2 kadar dayanım azalması olmuştur. Dayanımlardaki bu değişme; %10'luk Na₂SO₄ çözeltisinde %4, MgSO₄ çözeltisinde ise %7 olmuştur.

PÇ 42,5 çimentolu harçların 28 günlükleri dikkate alındığında kontrol numunesine göre; %5'lik Na₂SO₄ çözeltisi içinde kontrol numunesine göre %14 dayanım azalması gözlenirken, %5'lik MgSO₄ çözeltisindekilerde %13 kadar dayanım azalması olmuştur. %10'luk Na₂SO₄ içindeki numunelere bakıldığında %19 kadar, %10'luk MgSO₄ çözeltisindeki numunelerde ise %21 kadar dayanım azalması olduğu görülmektedir.

Bu durum PÇ 42,5 çimentolu harçların kimyasal yapı incelemeleri ile de doğrulanmaktadır. Bir çimentoda reaksiyonun hızı ve yönü üzerinde etkili olan Al₂O₃ miktarı incelendiğinde PÇ 42,5 çimentolarda %10'luk çözeltide bekletilenlerin değerleri %5'te bekletilenlerden daha az çıkmıştır. Bu durum %10'luk MgSO₄ çözeltisinin %5'likten daha fazla yıpratıcı olduğunu gösterir.

Benzer karşılaştırma MgO bakımından da yapılabilir. Çimentolarda MgO hacim genişmesi yaptığı için istenmez ve değerinin düşük olması istenir. %5 ve %10'luk Na₂SO₄ çözeltileri içindeki PKÇ 32,5 ve PÇ 42,5 numunelerin MgO değerleri incelendiğinde (Tablo 4.2 ve Tablo 4.3) hemen hemen kontrol çözeltisi numuneleri değerlerine yakın olduğu görülür. Buna karşın %5 ve %10'luk MgSO₄ çözeltisindeki numunelerin MgO değerleri yaklaşık 3 kat fazla çıkmıştır. MgO bakımından yapılan bu inceleme ve yorum, yine çimentoda istenmeyen oksitlerden SO₃ için yapıldığında PKÇ 32,5 ve PÇ 42,5 çimentolarının %5 ve %10'luk çözeltilerdeki değeri artış göstermiştir. Bu istenmeyen bir durumdur.

4.3. Mineralojik ve Mikroskopik Analizler

1. Yapılan Çalışmalar ve Sonuçlar

1.1. Mineralojik Analiz

Çimento numunelerinin mineralojik analizi, X-ışınları Difraktometresinde (Philips Expert PW 3040) toz difraksiyon yöntemiyle yapılmıştır. Sonuçlar aşağıda ve grafik olarak Şekil 4.7-4.12’de verilmiştir (TÇMB, Rapor, 1403, 2005).

PC 42.5 Kont.-Su

Quartz (SiO_2), Portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], C-S-H gel

PC 42.5 MgSO_4

Quartz (SiO_2), Portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], C-S-H gel, Ettringite [$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$]

PC 42.5 Na_2SO_4

Quartz (SiO_2), Portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], C-S-H gel, Ettringite [$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$]

PKÇ 32.5 Kont.-Su

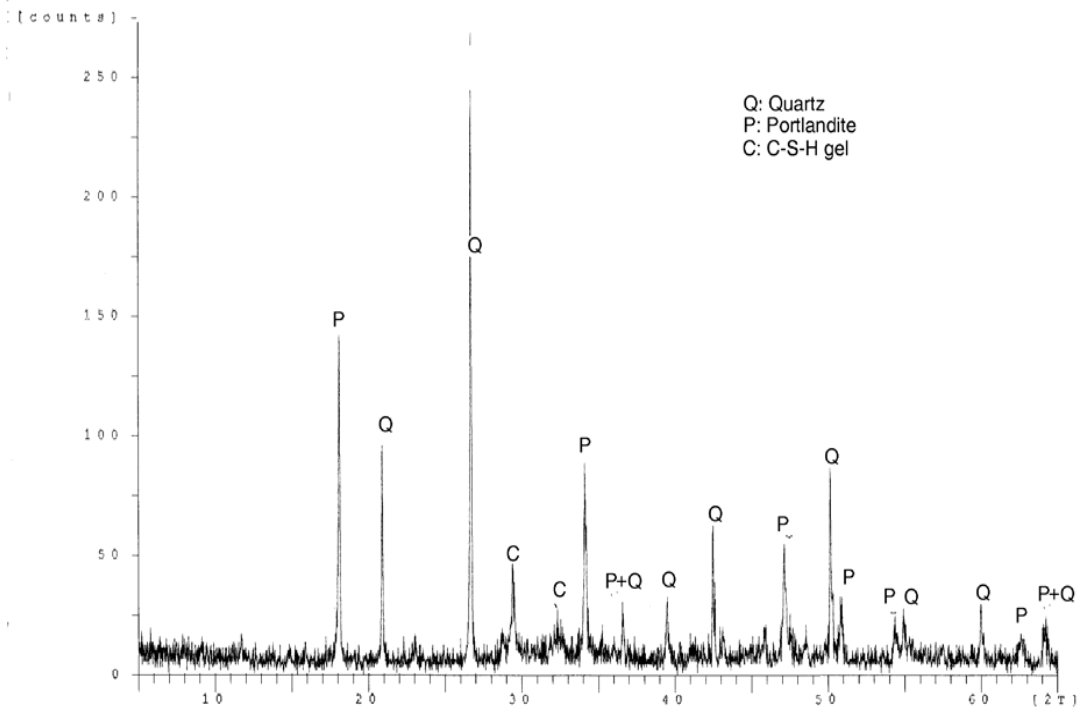
Quartz (SiO_2), Portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], C-S-H gel

PKÇ 32.5 MgSO_4

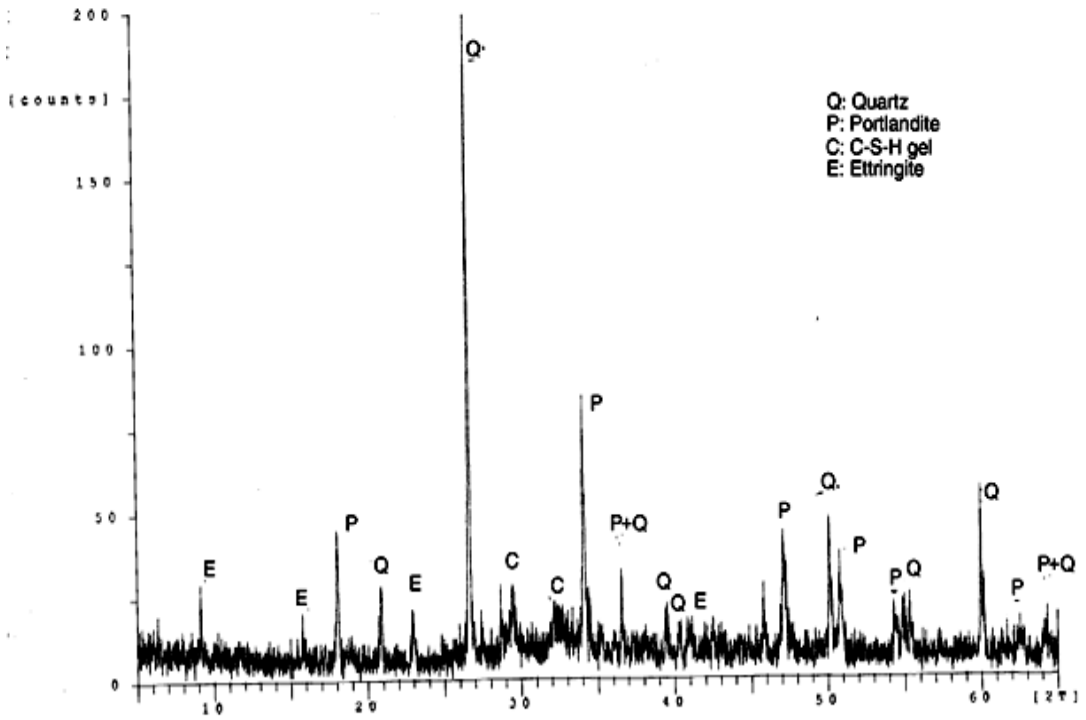
Quartz (SiO_2), Portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], C-S-H gel, Ettringite [$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$]

PKÇ 32.5 Na_2SO_4

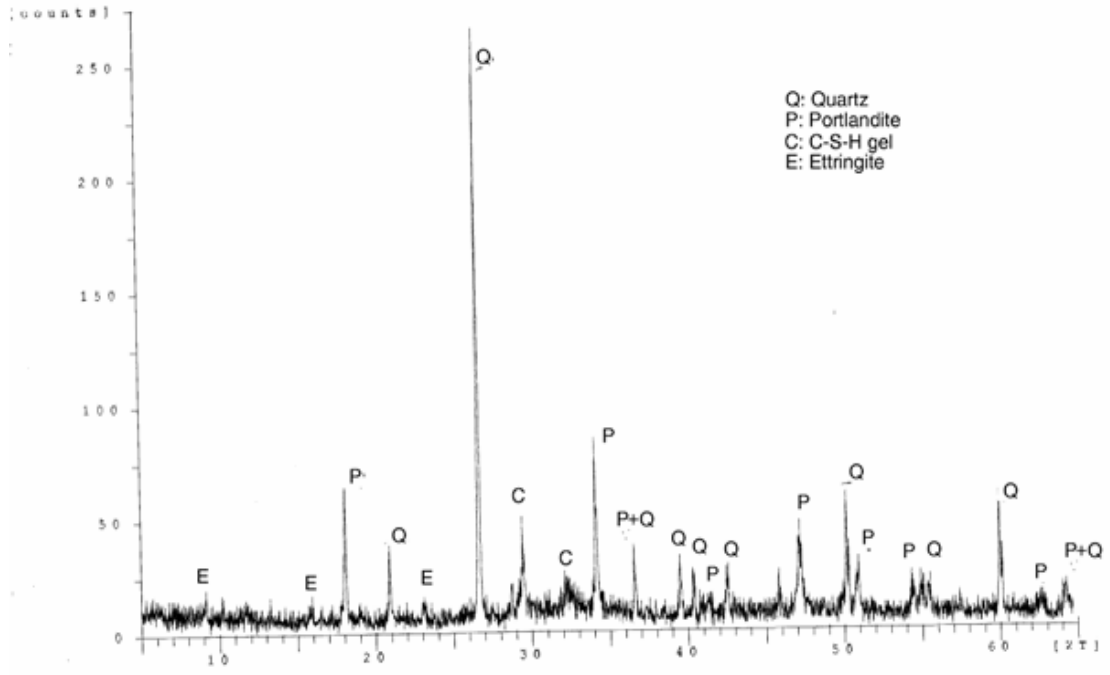
Quartz (SiO_2), Portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], C-S-H gel, Ettringite [$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$]



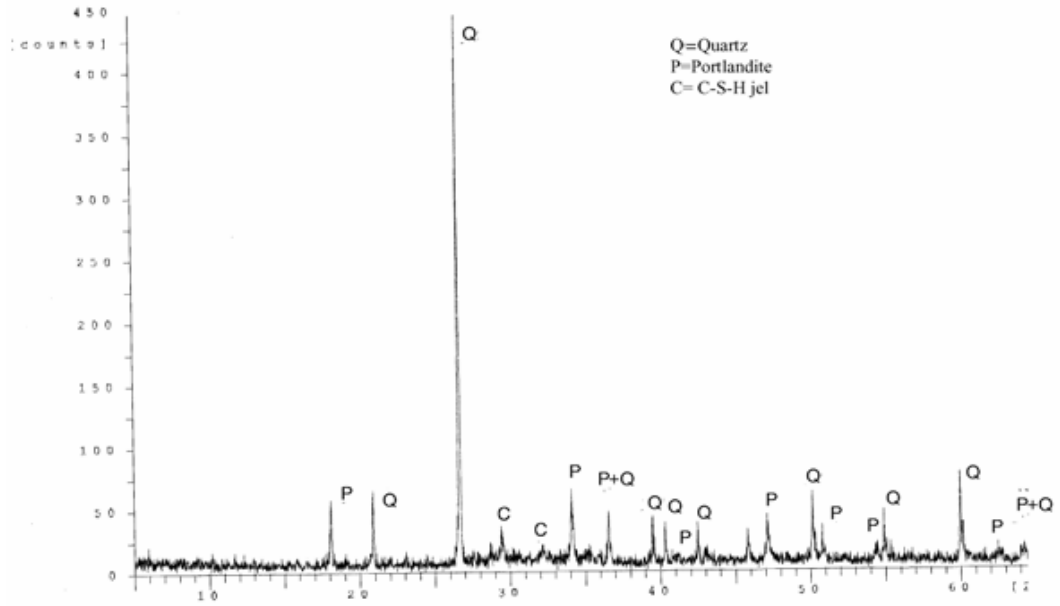
Şekil 4.7. PÇ 42.5 çimentosunun Kontrol (su) ortamındaki X-Ray difraksiyonu



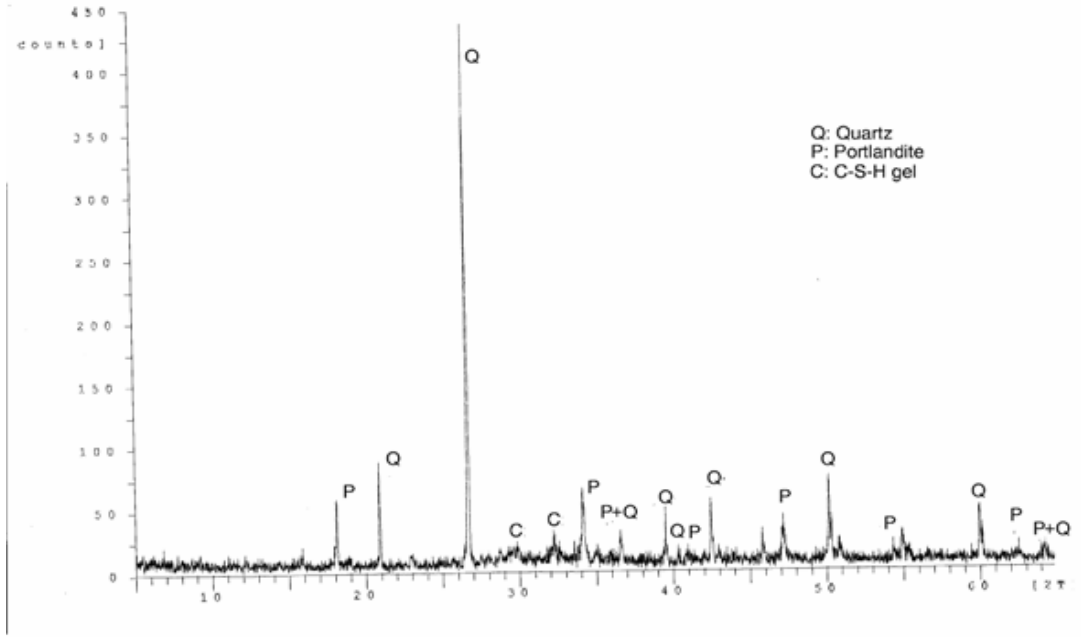
Şekil 4.8. PÇ 42,5 çimentosunun MgSO₄ ortamındaki X-Ray difraksiyonu



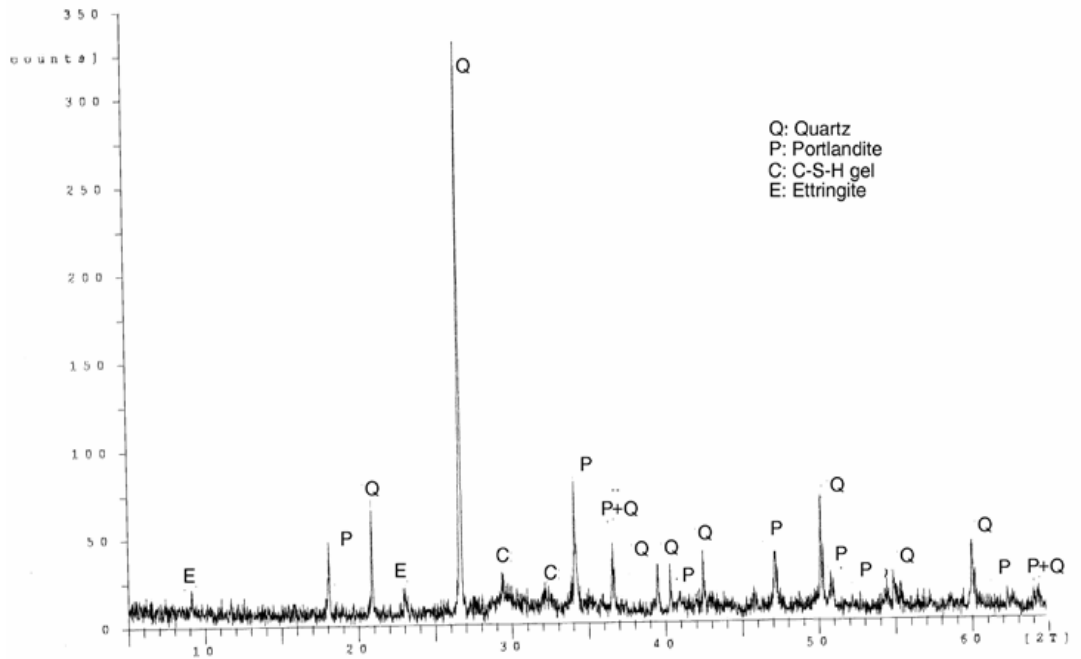
Şekil 4.9. PÇ 42,5 çimentosunun Na_2SO_4 ortamındaki X-Ray difraksiyonu



Şekil 4.10. PKÇ 32,5 çimentosunun kontrol (su) ortamındaki X-Ray difraksiyonu



Şekil 4.11. PKÇ 32,5 çimentosunun $MgSO_4$ ortamındaki X-Ray difraksiyonu



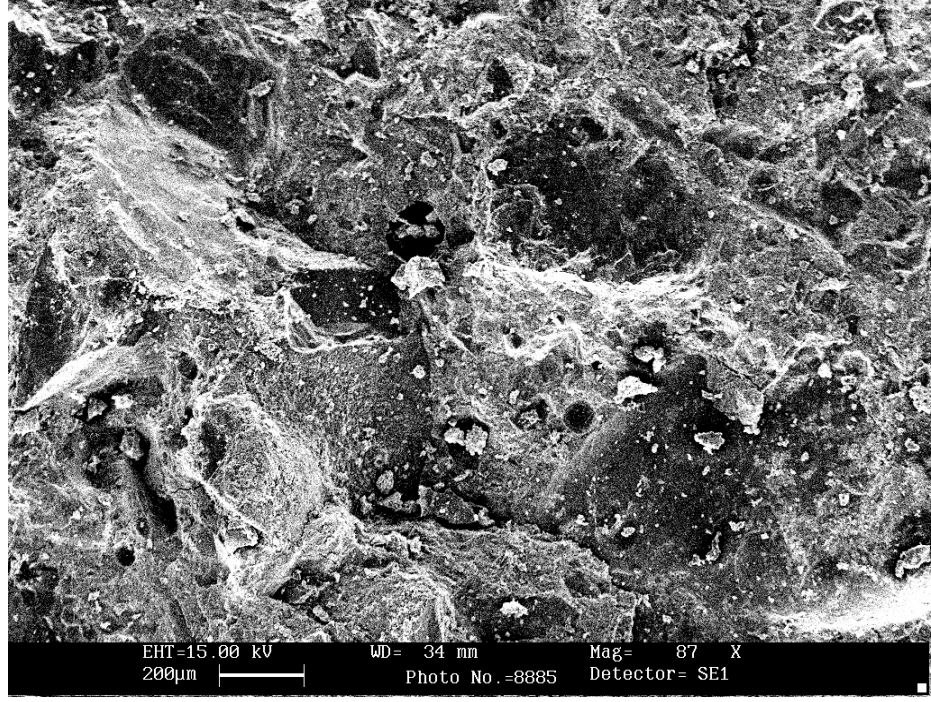
Şekil 4.12. PKÇ 32,5 çimentosunun Na_2SO_4 ortamındaki X-Ray difraksiyonu

PÇ 42,5 çimentolu numunelerin X-Ray difraksiyonu incelendiğinde; en önemli parametre olan ve gelişimi istenen C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) gelişimine bakmak gerekir. Kontrol PÇ 42,5 ile Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltilerindeki PÇ 42,5'lu numunelerde en az C-S-H gelişimi MgSO_4 içindeki numunelerde görülmüştür. Keza MgSO_4 çözeltisindeki numunelerde etrenjit de görülmüştür. Etrenjit, çimento ve betonda gelişimi engelleyen, yavaşlatan bir kimyasal yapıdır.

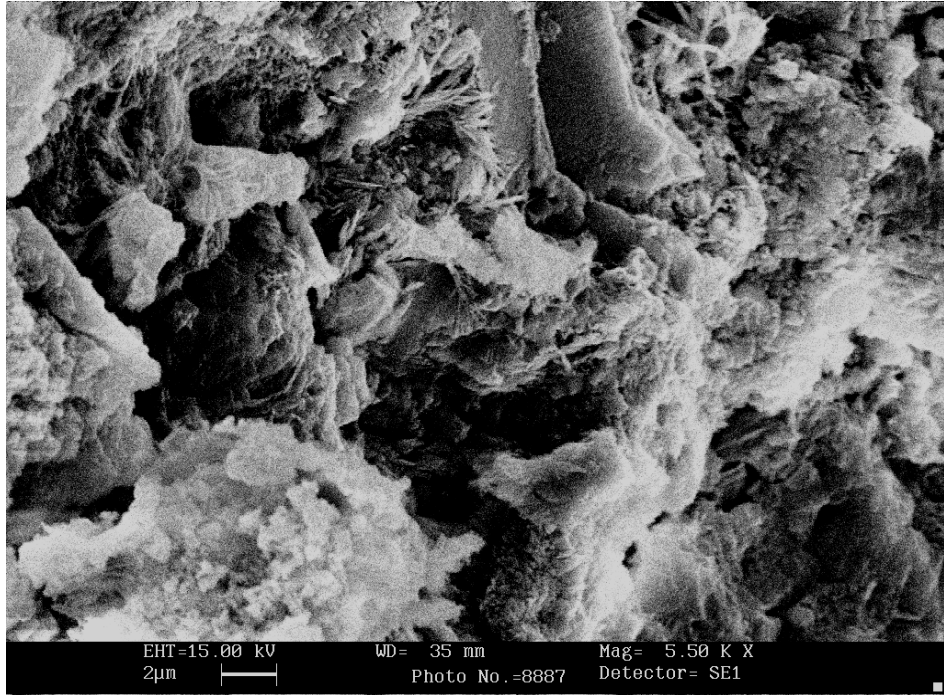
1.2. Mikroskobik Analiz

Çimento harç numunelerinin yüzeyleri altın ile kaplanmış ve mikro yapısal özellikleri, Tarama Elektron Mikroskobunda (LEO 435VP), ikincil elektron görüntüsü yöntemiyle incelenmiştir. İnceleme sonuçları Resim 4.1-4.12'de verilmiştir.

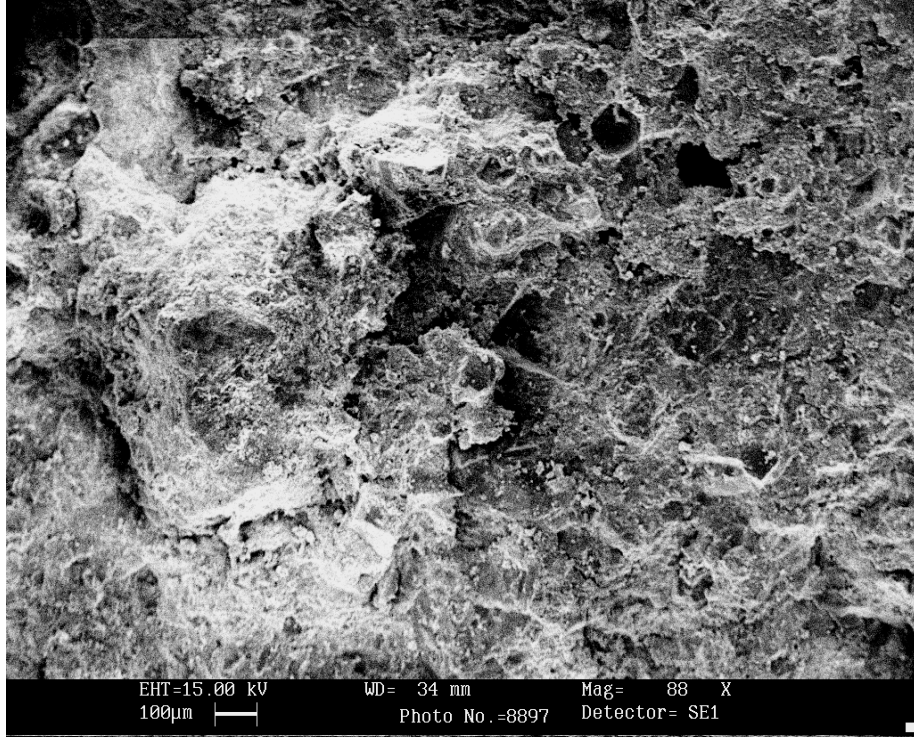
İncelenen tüm çimento harç numunelerinde, agrega taneleri bulunduğu ve gerek su ortamı, gerekse sülfatlı ortamlarda bekletilme sonrasında, çimentonun başlıca hidrasyon ürünlerinin (kalsiyum silikat hidrat, kalsiyum hidroksit, kalsiyum sülfoalüminat) meydana geldiği görülmüştür. PKÇ 32.5 numunelerinde su ve sülfatlı ortamlarda bekletilmelerde mikro yapıda belirgin farklılıklar görülmemiştir. PÇ 42.5 numunelerine gelince, sülfatlı ortamlarda (MgSO_4 ve Na_2SO_4) bekletilmede, su ortamına kıyasla biraz daha belirgin kalsiyum sülfoalüminat (etrenjit) görülmüştür (TÇMB, Rapor, 1403, 2005).



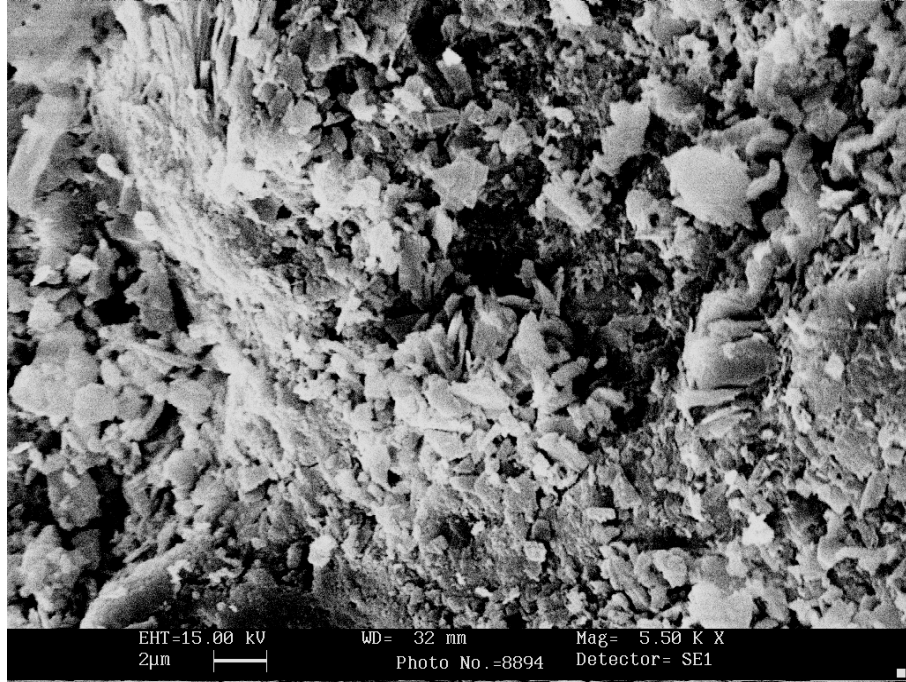
Resim 4.1. PÇ 42.5-Kontrol Numunesinin Genel Görünümü.



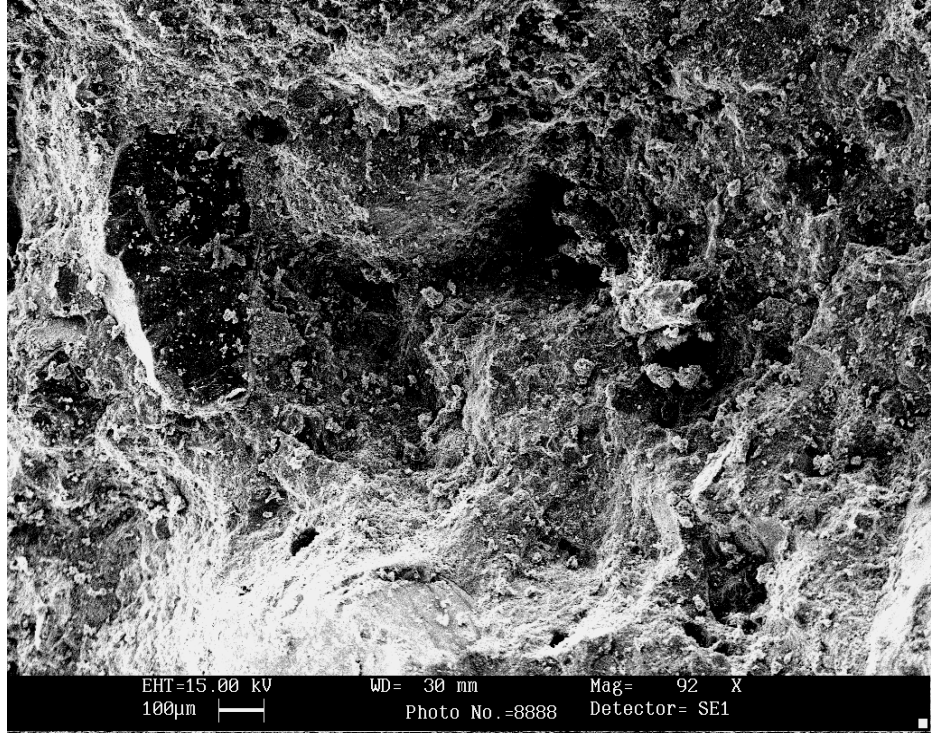
Resim 4.2. PÇ 42.5-Kontrol Numunesinin Mikro Yapısı.



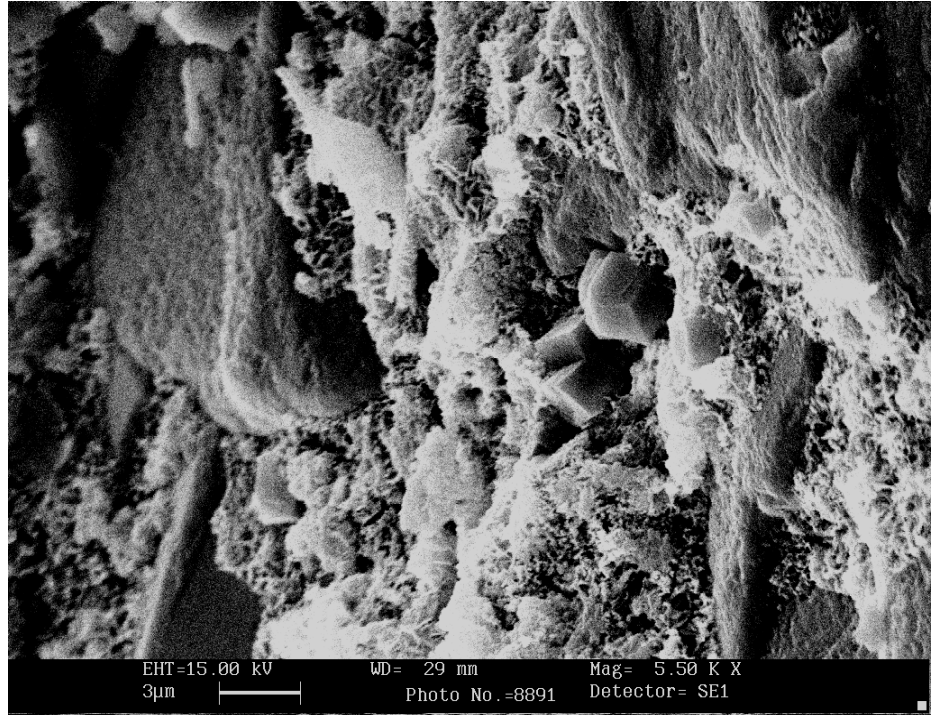
Resim 4.3. PÇ 42.5-MgSO₄ Numunesinin Genel Görünümü.



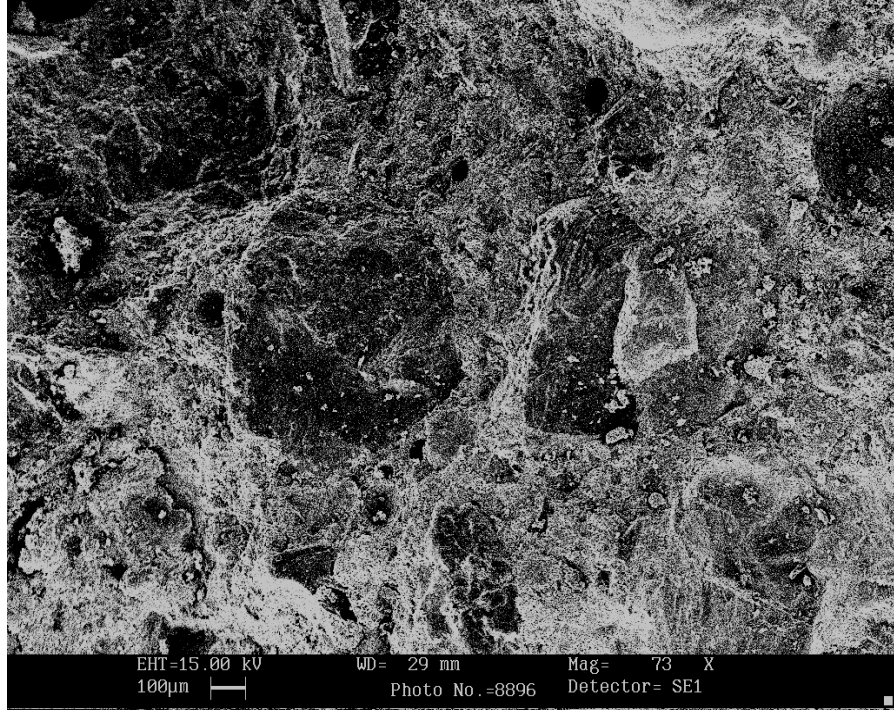
Resim 4.4. PÇ 42.5 MgSO₄ Numunesinin Mikro Yapısı.



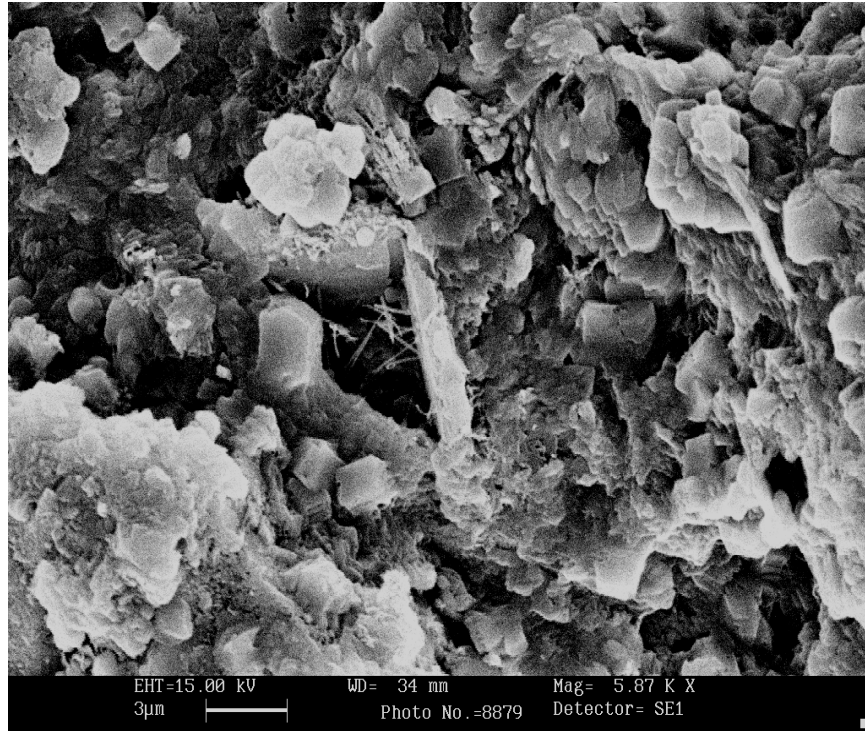
Resim 4.5. PÇ 42.5-Na₂SO₄ Numunesinin Genel Görünümü.



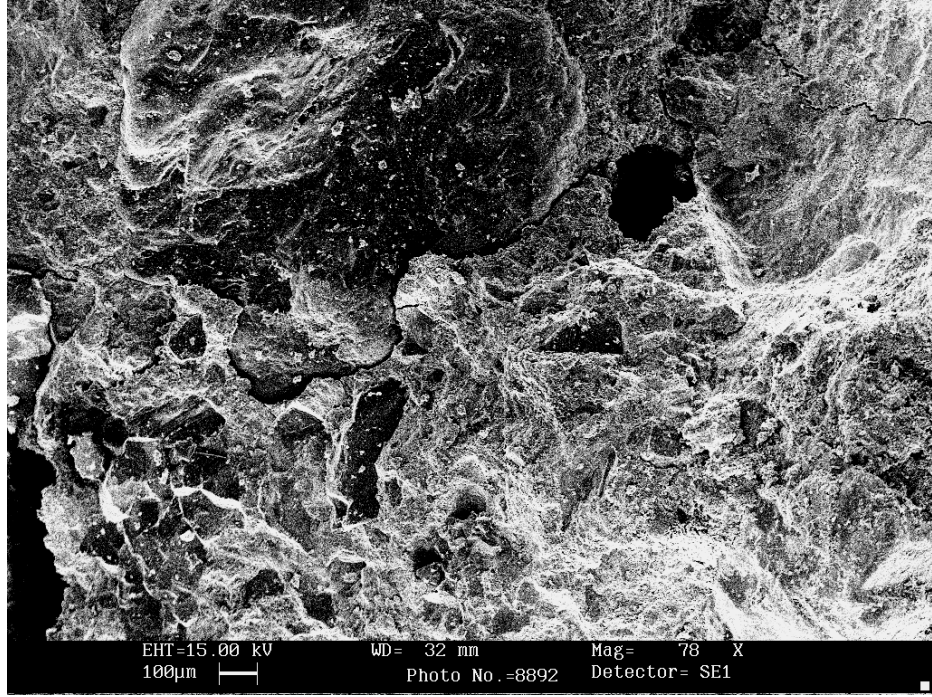
Resim 4.6. PÇ 42.5-Na₂SO₄ Numunesinin Mikro Yapısı.



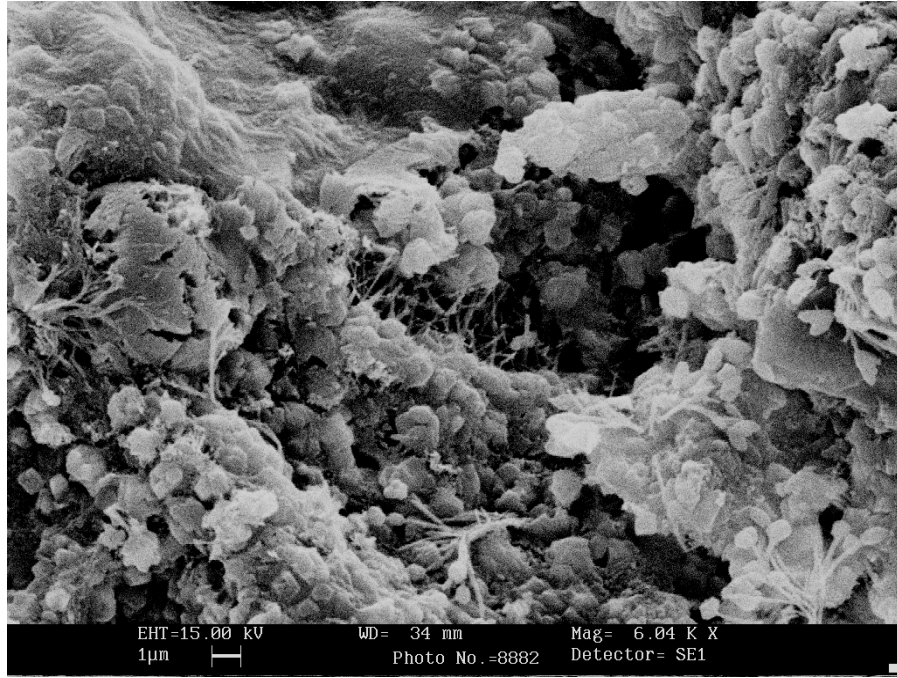
Resim 4.7. PKÇ 32.5-Kontrol Numunesinin Genel Görünümü.



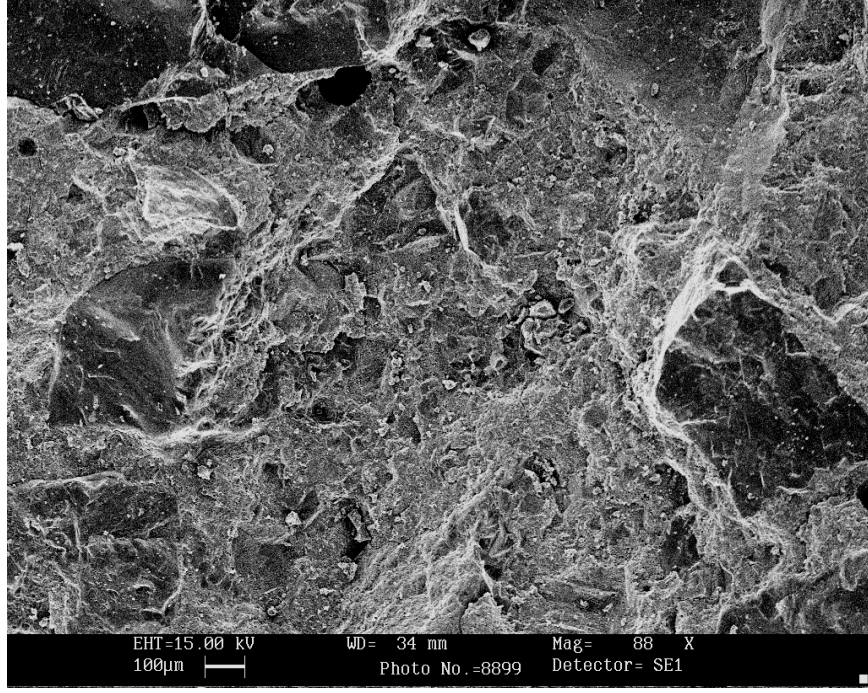
Resim 4.8. PKÇ 32.5-Kontrol Numunesinin Mikro Yapısı.



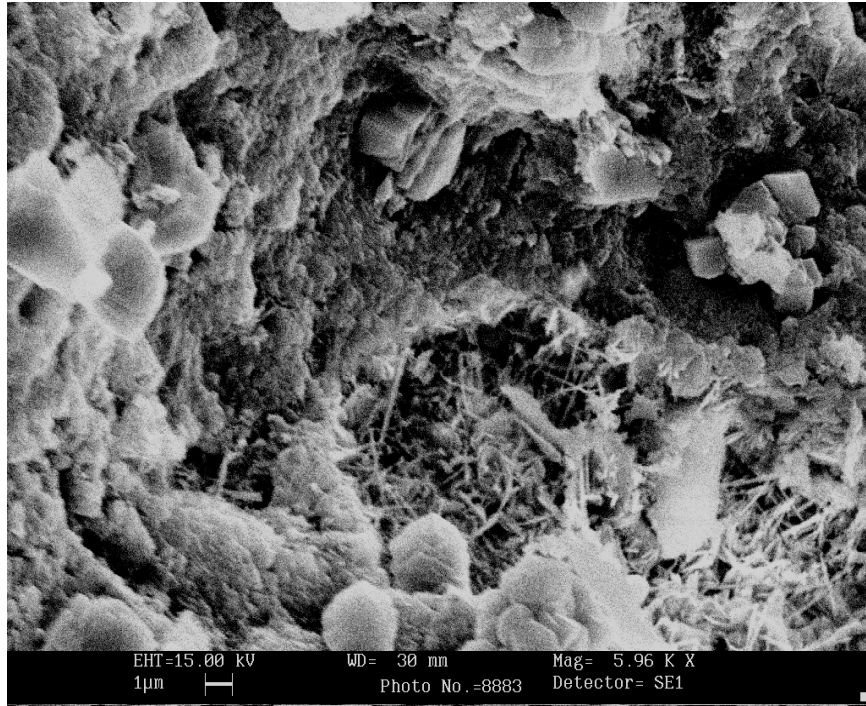
Resim 4.9. PKÇ 32.5-MgSO₄ Numunesinin Genel Görünümü.



Resim 4.10. PKÇ 32.5-MgSO₄ Numunesinin Mikro Yapısı



Resim 4.11. PKÇ 32.5-Na₂SO₄ Numunesinin Genel Görünümü.



Resim 4.12. PKÇ 32.5-Na₂SO₄ Numunesinin Mikro Yapısı.

Çimento harç numunelerinin mikroskobik resim analizlerine bakıldığında; Na₂SO₄ içinde bekletilmiş olan PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5'lu harçların karşılaştırılması yapıldığında,

PKÇ 32,5'lu numunelerde portlanditin daha fazla ve homojen geliştiği görülür. Bu tercih edilen bir durumdur. $MgSO_4$ içinde bekletilmiş olan PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5'lu harçların karşılaştırılması yapıldığında, PKÇ 32,5'lu numunelerin portlandit yapılarında homojenlik olmadığı, içyapıda kopukluklar olduğu görülür. Na_2SO_4 içinde bekletilen PKÇ 32,5'lu harçların resimlerinde portlandit bağlarının aralarında kısmen kopukluk olsa da gelişen kısımların çok kuvvetli ve etkin olduğu görülür. PKÇ 32,5'lu numunelerin Na_2SO_4 içindeki genel görünümün $MgSO_4$ içinden daha homojen bir dağılımı göstermektedir. Bu husus PÇ 42,5'lu numuneler için de geçerlidir.

4.4. Uygulama Sonuçları ve Tartışma

Çimento ile harç ve beton gibi çimentolu ürünler insanlığın geçmişte en fazla kullandığı ve gelecekte en fazla kullanacağı yapı malzemesi olmakla beraber aynı zamanda en fazla küçümsenen ve özellikleri az bilinen malzemelerdir. Günümüze kadar geçen süre içinde portland çimentosu özellik ve üretim prosesleri yönlerinden sürekli gelişti. Bu gelişmenin bir parçası olarak PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 çimentoların harçlarda durabilite özelliklerini ortaya çıkaracak bir çalışma ihtiyacı duyuldu ve burada bu ihtiyaç yerine getirildi.

Bu çalışma literatür bilgileri ışığında yapılan deneysel bir araştırmadır. PÇ 42,5 ve PKÇ 32,5 çimentoları ile yapılan standart harçların Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ gibi yıpratıcı ortamlardaki performans farklılıkları ortaya konulmuştur. Bunun için; çimento numunelerinin fiziksel ve kimyasal analizleri ile 40x40x160 mm'lik harç numuneleri üzerinden basınç, içyapıya yönelik olarak X-ışınları difraktometresi ile mineralojik analiz ve taramalı elektron mikroskopunda mikro yapıya yönelik mikroskobik analizler yapılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir çimentoya (PÇ), hidrasyon esnasında oluşabilecek serbest kireci $[Ca(OH)_2]$ 'yi bağlayarak yararlı bileşik haline gelmesi için puzolan katılır. PKÇ 32.5 içinde puzolan olan bir çimento türüdür. İçinde serbest kireç $[Ca(OH)_2]$ olmaması gereken bir çimentoda $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 gibi ortamlarda 28 günlük bekletilme sonunda PÇ 42.5'ta daha belirgin etrenjit meydana gelmesi, sülfatlı ortamların PKÇ 32.5 çimentolarına olumsuz etkilerinin az olduğunun kanıtıdır.

PÇ 42.5 çimentosu bileşim ve reaksiyon özelliklerinin dayanıma olumlu yansıyan bir tür olmasına karşın PKÇ 32.5'dan (TÇMB, Rapor; 619. 2005) daha fazla dayanıklı olduğu söylenebilir.

Eğer ortamda sülfatlı çözeltilerin varlığı söz konusu ise, PKÇ 32,5 daha fazla durabilite özelliği göstermektedir. Çözeltiler içinde $MgSO_4$, Na_2SO_4 'ten daha fazla yıpratıcı etkiye sahiptir. Bu araştırmadaki basınç değerlerinin tekrarlamalı deneylerden sonra doğrulanarak kullanılmasının, çözeltiler içindeki bekletilme sürelerinin de daha uzun alınmasının yararlı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- AKMAN, M. S., **Yapı Malzemeleri**, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1987.
- AKÖZ, F. ve BİRİCİK, H., **Sodyum Sülfat Çözeltisinin Buğday Sapı Külü Katkılı ve Katkısız Harçlara Etkileri**, Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, 5(26), Ankara 2000.
- AKÖZ, F., YÜZER, N. ve KORAL, S., Silis Dumanı Katkılı ve Katkısız Harçlara Sodyum Klorür ve Magnezyum Klorürün Etkileri, **4.Ulusal Beton Kongresi**, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul 1996.
- ATAHAN, H. N., PEKMEZCİ, B. Y., UYAN, M. ve YILDIRIM, H., Sülfatların Portland Çimentolu ve Sülfata Dayanıklı Çimentolu Betonların Durabilitesine Etkisi, **5.Ulusal Beton Kongresi**, Betonun Dayanıklılığı (Durabilite), Cemal Reşit Rey Konser Salonu, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul.
- DPT (Devlet Planlama Teşkilatı), **Diğer Endüstri Mineralleri Cilt-1**, Yayın No: DPT: 2421-OİK: 480, Mart 1996.
- DPT (Devlet Planlama Teşkilatı), **Diğer Endüstri Mineralleri Cilt-2**, Yayın No: DPT: 2421-ÖİK: 480, Mart 1996.
- DPT (Devlet Planlama Teşkilatı), Diğer Endüstri Mineralleri, **VII. Beş Yıllık Kalkınma Planı, Özel İhtisas Komisyonu Raporu Cilt 1**, Ankara 1996.
- ERDOĞDU, K., TOKYAY, M., TÜRKER, P., **Traslar ve Trash Çimentolar (Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu)**, Ar-Ge Enstitüsü TÇMB, Ankara 2003.
- FENG, N. Q., JIA, H., CHEN, E., (1998) “**Study on the Suppression Effect of Natural Zeolite on Expansion of Concrete Due to Alkali-Aggregate Reaction**”, Magazine of Concrete Research, Vol. 50, pp.17-24.
- FENG, N. Q., Lİ, Z., G., ZANG, X. W., (1990) “**High- strenght and Flowing Concrete with a Zeolite Mineral Admixture**”, Cement and Aggregates, ASTM. Vol. 12, pp.61-69.
- GOTTARDI, G., GALLI, E., **Natural Zeolites**, Springer Verlag, Berlin 1985.
- GÜNLÜ, A., **Yüksek Fırın Cüruflarının Çimento Üretiminde Kullanılmasında Öğütme ile İlgili Parametrelerinin Belirlenmesi**, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Master Tezi, Ankara 1999.
- KILINÇ, K. ve UYAN, M., Beton Karışım Suyundaki Sülfat Tuzlarının Çimento Harcı Özelliklerine Etkisi, **5.Ulusal Beton Kongresi**, Betonun Dayanıklılığı (Durabilite), Cemal Reşit Rey Konser Salonu, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul.
- KILINÇ, K., Beton Karışım Suyundaki Magnezyum Sülfat, Sodyum Sülfat ve Sodyum Sülfür Tuzlarının Taze ve Sertleşmiş Çimento Harcı Özelliklerine Etkisi. www.itu.edu.tr/tezozetleri.
- KILINÇKALE, F., M. ve UYAN, M., Tras Çimentolu Harçların Dayanım ve Dayanıklılığına Sülfatlı Çözeltilerin Etkisi. www.imo.org.tr/td/Tdgeomis/cilt07/htm/Ocak/1996.
- LEA, F, M, **The Chemistry of Cement and Concrete**, 3.baskı, Chemical Publishing Company, Inc, London 1970.
- MEIER, W. M., **Zeolite Structures: Molecular Sieves**, Soc. Clem. Ind., London, 1968.
- NEVILLE, A.M., **Properties of Concrete**, Pitman Publishing Ltd., London 1977.

- OYMAEL, S., **Bitümlü Şist Külünün Çimento ve Betonda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi (Doktora Tezi)**, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ 1995.
- OYMAEL, S., **Yapı Bilgisi I**, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul 2003.
- OYSA Çimento Fabrikası, **Rapor**, 30.03.2005, İskenderun.
- ÖZDEMİR, H., İ., **Genel ve Anorganik Teknik Kimya**, İstanbul Üniversitesi Yayınevi, İstanbul 1981.
- ÖZER, B., Doğal Puzolanlar ile Üretilen Betonlarda Kür Etkisinin İncelenmesi. www.itu.edu.tr/tezozetleri.
- POONE, C. S., LAM, L., Kou, S. C., Lin, Z. S., (1999) "A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cements", Construction and Building Materials, Vol. 13, pp.427-432.
- SAYAR, M., **Mineroloji ve Jeoloji**, ss. 127-128, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1960.
- SCRAHAMLİ, W., **An Attempt to Assess Beneficial and Detrimental Effects of Alüminate in the Cement on Concrete Performance**. Part II, World Cement Technology, No:3, ss. 75-80, 1979.
- SMİTH, W.F., (Çev: KINIKOĞLU, N., G.), **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği**, Mart Matbaacılık, 2001.
- ŞENSÖZ, E. ve YALÇIN, S., Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, **Betonlarda Alkali-Agrega Reaksiyonu**, (35), Ankara, 2002.
- TÇMB (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği) **Rapor No: 1403**, Ankara, 24 Haziran 2005.
- TÇMB (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği), **Çimento**, Demo Reklamcılık ve Bilişim Hizmetleri Ltd.Şti, Ankara 2005.
- TOKYAY, M., **Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar**, TÇMB yayını Yayın no: AR-GE/197-2, Ankara 2003.
- TS 819, **Rilem-Chembureau Sand**, TSE, Ankara 1989.
- TS EN 197-1, **Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri**, Türk standartları Enstitüsü, 2002,
- USHİYAMA, GOTO,1974. **Diffusion of Various Ions in hardened Portland Cement Paste**. Proc. VI. ICC. Sec. II, 1975.
- YEĞİNOBALI, A. ve ERTÜN, T., **Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar**, Ar-Ge Enstitüsü TÇMB, Ankara 2004.
- YEĞİNOBALI, A., **Çimento "Yeni Bir Çağın Malzemesi"**, Ar-Ge Enstitüsü TÇMB, Ankara 2004.
- YEĞİNOBALI, A., SOBOLEV, K.G., SOBOLEVA, S.V. ve KIYICI, B., Thermal Resistance of Blast Furnace Slag High Strength Cement, **1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement (Turkish Cement Manufacturers Association)**, 6-9 November 1997, İstanbul.
- YILMAZ, İ., İÇEMER, Ö., AKBAY, K. ve ÖZSOY, A., Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Teknik El Kitapları, **Beton Laboratuar Deneyleri**, Ankara, 1985.
- YOUNG, J.F. ve EDUC, J., **Journal of Materials Science Education**, Modüler Mater. Sci., 3:40, 1981.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Antakya'da doğdum. İlkokul öğrenimimi Kahramanmaraş'ta, orta ve lise öğrenimimi Antakya'da tamamladım. 1998 yılında girdiğim Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 2002 yılında, İnşaat Mühendisi unvanıyla mezun oldum. Aynı yıl Mustafa Kemal Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde yüksek lisansa başladım. Ekim 2005 itibari ile de yüksek lisans tezimi tamamlamış durumdayım.