

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAKAOLİN KATKILI HARÇLARIN BAZI
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Melek Müge TEVRİZCİ

Şubat, 2010

İZMİR

**METAKAOLİN KATKILI HARÇLARIN BAZI
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı**

Melek Müge TEVRİZCİ

**Şubat, 2010
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MELEK MÜGE TEVRİZCİ, tarafından **DOÇ.DR. SELÇUK TÜRKEK** yönetiminde hazırlanan “**METAKAOLİN KATKILI HARÇLARIN BAZI DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç.Dr. Selçuk TÜRKEK

Yönetici

Prof. Dr. Bülent BARADAN

Jüri Üyesi

Yard.Doç.Dr Şemsi YAZICI

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez aşamasında değerli bilgileri, sabrı ve güler yüzü ile göstermiş olduğu ilgi, destek ve tezin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı, değerli bilgi birikimi ve önerilerinden yararlandığım Tez Danışmanım Sayın Doç Dr. Selçuk TÜRKEKEL' e yürekten teşekkürü borç bilirim. Tez çalışmam sırasındaki değerli görüş ve katkıları için Sn. Prof. Dr. Bülent BARADAN' a çok teşekkür ederim.

Literatür araştırmalarım ve deneysel çalışmalarım sırasında destek aldığım, her konunun irdelenmesi ve sorunların çözümünde benden yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Müh. Kamile TOSUN' a yürekten teşekkür ederim. Laboratuarda teknik destek ve yardımlarından dolayı Sayın Doç. Dr. Halit YAZICI' ya, Sayın Dr. Müh. Hüseyin YİĞİTER' e, Sayın Dr. Müh. Burak FELEKOĞLU' na ve Sayın Dr. Müh. Serdar AYDIN' a çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, sabır, sevgi, hoşgörü ve ilgileri ile beni yalnız bırakmayan babam Tefvik YILDIRIM' a ve annem Emine YILDIRIM'a, deneysel çalışmalarım sırasında beni yalnız bırakmayan kardeşlerim Mine GÜNGÖR ve Mehlike YILDIRIM' a sonsuz destekleri için teşekkür ederim. Laboratuar çalışmalarımda bana yardımlarını esirgemeyen kardeşlerim İbrahim YILDIRIM ve Tefvik YILDIRIM' a teşekkür ederim.

Son olarak sevgili eşim Ali TEVRİZCİ' ye çalışmalarım sırasında göstermiş olduğu karşılığı olmayan sonsuz sabır, anlayış ve destek için teşekkür ederim.

Melek Müge TEVRİZCİ

METAKAOLİN KATKILI HARÇLARIN BAZI DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Beton günümüzde en yaygın şekilde kullanılan yapı malzemesidir. Yapay bir malzeme olan betonun olumlu özelliklerini sürdürebilmesi için kalıcı olması gerekmektedir. Ancak beton kullanım ömrü boyunca pek çok nedenle bozulmaya uğrar. Beton veya betonarme elemanların zamanla bozulmalarına çeşitli iç veya dış etkenler neden olur. Bu etkenler fiziksel, kimyasal, biyolojik veya mekanik kökenli olabilir. Dış etkiler arasında; sülfat etkisi, donma-çözülme, aşınma, karbonatlaşma, bazı asit ve tuz etkileri sayılabilir. Hasarın şiddeti bu dış etkilerin derecesi ve betonun kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Ancak çok şiddetli etkiler altında korunmadığı takdirde, çok kaliteli beton elemanlar da harap olabilir. İç etkiler arasında; alkali-agrega reaksiyonları, gecikmiş etrenjit oluşumu, klor geçirimsizliği ve kapiler su emme özelliği gibi etkiler sayılabilir.

Tez çalışması kapsamında kaolin kilinin 600-800⁰C arası sıcaklıklarda kalsine edilmesiyle üretilen bir mineral katkı olan metakaolin (MK) ile üretilen harç örneklerinin, gecikmiş etrenjit oluşumu, alkali silika reaksiyonu, klor geçirimsizliği ve kapiler su emme ve toplam su emme özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Metakaolin 8 farklı oranda karışımlara katılarak 2 grup oluşturulmuştur. I. grup karışımlarda su/bağlayıcı oranını değiştirerek yayılma değeri sabit tutulmuştur. II. grup karışımlarda sabit yayılma çapı için süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmış ve su/bağlayıcı oranınının 0,5 olarak sabit kalması sağlanmıştır.

Çalışmanın sonucunda MK katkısının, harçların ASR, klor geçirimsizliği ve kapilerite katsayısını önemli ölçüde azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Metakaolin, durabilite, gecikmiş etrenjit oluşumu, alkali-silika reaksiyonu, klor geçirimsizliği, kapiler su emme.

AN INVESTIGATION ON THE DURABILITY PROPERTIES OF MORTARS INCLUDING METAKAOLIN

ABSTRACT

Concrete is the most commonly used construction material for many decades. Concrete, as an artificial material, must be durable in order to sustain its useful features. However, concrete may deteriorate due to various internal and external agents during its service life. These agents may cause attacks and mechanisms. physical, chemical, biological or mechanical. Sulphate attack, freeze and thaw, wearing, carbonation, various acid or salt effects could be considered as external factors. The size of damage depends on the the magnitude of these external factors and the quality of the concrete. However even use of high quality concrete materials may lead to shorter service life of structures as long as they are not designed, produced and protected against these attacks. Alkali aggregate reactions, delayed ettringite formation, chloride permeability and water absorption are considered as internal factors.

In the context of the thesis, metakaolin (MK), produced temperatures between 600-800⁰C by calcining of kaolin clay, is used as the mineral admixture. MK incorporated to the mortar mixtures in 8 different proportions in order to determine delayed ettringite formation, alkali silica reaction, chloride permeability and capillary water absorption properties. Two different groups were prepared. In the first group, the water/binder ratio is varying depending on the water requirement of the mixtures. In the second group, superplasticizer chemical admixture has been incorporated to the mixtures in order to have a constant water/binder ratio of 0,5. The several result of this investigation may be concluded as, MK incorporation reduces ASR, chloride permeability and capillary water absorption properties of the mortars.

Key Words: Metakaolin, durability, delayed ettringite formation, alkali silica reaction, chloride penetration, capillary water absorption.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT	v
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – METAKAOLİN.....	7
2.1 Metakaolinin Tarihçesi	10
2.2 Puzolanik Aktivite.....	13
2.3 Kalsinasyon Sıcaklığı	14
BÖLÜM ÜÇ – GECİKMİŞ ETRENJİT OLUŞUMU	15
3.1 Gecikmiş Etrenjit Oluşumunun Tespiti ve Tarihçesi.....	15
3.2 Etrenjit Morfolojisi.....	29
3.3 GEO Kaynaklı Genleşmeyi Etkileyen Faktörler	31
3.3.1 GEO Kaynaklı Genleşmeyi Etkileyen İç Faktörler	32
3.3.1.1 Çimentonun Kimyasal Kompozisyonu	33
3.3.1.1.1 SO ₃ Miktarı	33
3.3.1.1.2 C ₃ A Miktarı	35
3.3.1.1.3 Alkali Miktarı	36
3.3.1.1.4 C ₃ S Miktarı	37
3.3.1.2 Çimentonun Özgül Yüzey Alanı	37
3.3.1.3 Agrega Tipi, Boyutu ve Miktarı	38

3.3.1.4 S/Ç Oranı ve Geçirimsizlik	42
3.3.1.5 Mineral Katkı Kullanımı	43
3.3.1.6 Lif Kullanımı	46
3.3.2 GEO Kaynaklı Genleşmeyi Etkileyen Dış Faktörler	46
3.3.2.1 Buhar Kürü Koşulları.....	46
3.3.2.2 Buhar Kürü Sonrasında Bekleme Koşulları (Ortamın Alkalinitesi)	51
3.3.2.3 Buhar Kürü Sonrasında Bekleme Sırasında Fiziksel Hasar Yaratıcı Etkiler (Islanma - Kuruma)	52
3.4 Gecikmiş Etrenjit Oluşumunun Tespitine Yönelik Deney Yöntemleri	54
3.4.1 GEO Potansiyelini Tespitte Kullanılan Hızlandırılmış Deney Yöntemleri	56
3.4.1.1 Duggan Yöntemi.....	58
3.4.1.2 Attiogbe Yöntemi	60
3.4.1.3 Fu Yöntemi.....	61
3.4.1.4 Kelham Yöntemi.....	62

BÖLÜM DÖRT – ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU 64

4.1 Alkali Silika Reaksiyonunun Tarihçesi	64
4.2 Alkali Silika Reaksiyonu	66
4.3 Alkali Silika Reaksiyonunun Kimyasal Mekanizması	73
4.3.1 Reaktif Silikanın Çözünmesi.....	73
4.3.2 Alkali Silika Jelinin Oluşumu ve Bileşimi.....	75
4.3.3 Alkali Silika Jelinin Genleşmesi	78
4.4 Pesimum Davranış.....	81
4.5 Alkali Silika Reaktivitesinin Belirlenmesi.....	84
4.5.1 ASTM C 295 – Agregaların Petrografik Analizi.....	85
4.5.2 ASTM C 227 – Harç Çubuğu Metodu.....	85
4.5.3 ASTM C 441 – Mineral Katkıların veya Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliklerini Ölçen Standart Deney Metodu.....	86

4.5.4 ASTM C 1293 – Beton Prizma Metodu.....	87
4.5.5 ASTM C 1260 – Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metodu.....	88
4.5.6 Jel Pat Metodu.....	89
4.5.7 Alman Çözünme Metodu.....	89
4.5.8 Ozmotik Hücre Metodu.....	90
4.5.9 Otoklav Metotları.....	90
4.6 Mineral ve Kimyasal Katkıların ASR' ye Etkileri.....	91
4.6.1 Mineral Katkıların ASR' ye Etkisi.....	91
4.6.1.1 Uçucu Külün ASR' ye Etkisi.....	93
4.6.1.2 Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) ASR' ye Etkisi.....	94
4.6.1.3Doğal Puzolanların ASR' ye Etkisi.....	95
4.6.2 Kimyasal Katkıların ASR' ye Etkisi.....	95
4.6.3 Kimyasal ve Mineral Katkıların Birlikte Kullanımı.....	96
BÖLÜM BEŞ – KLOR GEÇİRİMLİLİĞİ VE KAPİLER SU EMME.....	98
5.1 Klor Geçirimsizliği.....	98
5.2 Kapiler Su Emme.....	103
BÖLÜM ALTI – BASINÇ DAYANIMI.....	106
6.1 Çimento İle İlgili Faktörler.....	107
6.2 Yoğurma Suyu İle İlgili Faktörler.....	108
6.3 Kompasitenin Dayanım Üzerindeki Etkisi.....	110
6.4 Dış Etkiler – Kür Koşulları.....	110
6.5 Deney Koşulları – Örnek Şekil ve Boyutları.....	112
BÖLÜM YEDİ – DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	115

7.1 Deneysel Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	115
7.2 Malzeme Özellikleri	117
7.2.1 Çimento.....	117
7.2.2 Doğal Kum.....	118
7.2.3 Su.....	119
7.2.4 Metakaolin	120
7.2.5 Süperakışkanlaştırıcı.....	121
7.3 Karışımların Hazırlanması ve Numunelerin Kürü.....	121
7.3.1 Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (GEO)	122
7.3.2 Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)	124
7.3.3 Klor Geçirimsizliği	126
7.3.4 Kapiler Su Emme	129
7.3.5 Eğilme ve Basınç Dayanımı.....	131
BÖLÜM SEKİZ – DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER.....	134
8.1 Deneysel Çalışmaların Sonuçları	134
8.1.1 Gecikmiş Etrenjit Oluşumu Deneyi Sonuçları	134
8.1.2 Alkali Silika Reaksiyonu Deneyi Sonuçları.....	141
8.1.3 Klor Geçirimsizliği Deneyi Sonuçları.....	144
8.1.4 Kapiler Su Emme Deneyi Sonuçları.....	149
8.1.5 Eğilme ve Basınç Dayanımı	156
8.2 Deney Sonuçlarının Su/Bağlayıcı Oranı ile İlişkisi.....	167
8.3 Sonuçlar	170
8.4 Öneriler.....	172
KAYNAKLAR.....	173
EKLER.....	183

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Beton günümüzde en yaygın şekilde kullanılan yapı malzemesidir. Yapay bir malzeme olan betonun olumlu özelliklerini sürdürebilmesi için kalıcı (durabil) olması gerekmektedir. Ancak beton kullanım ömrü boyunca pek çok nedenle bozulmaya uğrar.

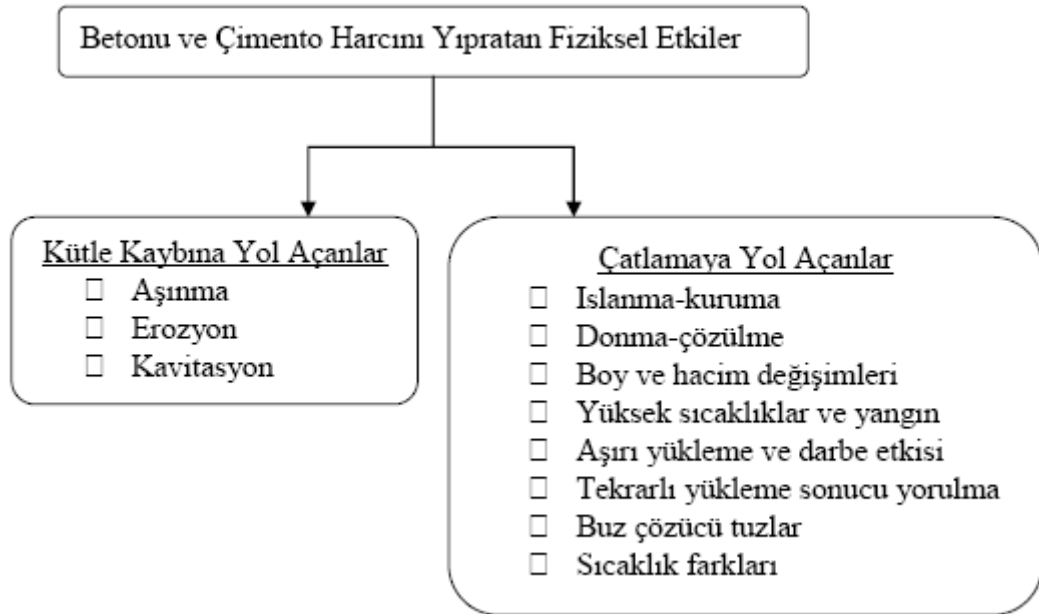
Beton veya betonarme elemanların zamanla bozulmalarına çeşitli iç veya dış etkenler neden olur. Bu etkenler fiziksel, kimyasal, biyolojik veya mekanik kökenli olabilir. Dış etkiler arasında; sülfat etkisi, donma-çözülme, aşınma, karbonatlaşma, bazı asit ve tuz etkileri sayılabilir. Hasarın şiddeti bu dış etkilerin derecesi ve betonun kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Ancak çok şiddetli etkiler altında korunmadığı takdirde, çok kaliteli beton elemanlar da harap olabilir. İç etkiler arasında; alkali-agrega reaksiyonu, gecikmiş etrenjit oluşumu, agrega ve çimento harcının termal özellikleri arasındaki farklılıklar gibi etkiler sayılabilir (Baradan ve diğer., 2002).

Kalıcılığın sağlanmasını zorlaştıran en önemli etken su ve nemin varlığıdır. Su beton içine zararlı maddeleri taşıdığı gibi, kimyasal reaksiyonların oluşumuna katkı sağlar. Kimyasal etkilere maruz kalan betonlarda, içeri sızan sularda bulunan sülfat, asit ve benzeri zararlı maddeler beton içindeki bileşenlerle reaksiyona girer ve sertleşmiş betonda hasarlara sebep olur (Baradan ve diğer., 2002).

Betonun bozulması çoğunlukla tek bir nedene bağlanamaz. Birkaç etkinin bir arada veya peş peşe oluşması sonucu, beton veya betonarme elemanların umulmadık kısa sürelerde bozulduklarını görmek mümkündür (Baradan ve diğer., 2002).

Mehta ve Gerwick, betonun fiziksel bozulmasına sebep olan etkenleri iki kategoride gruplanmıştır: (a) yüzey aşınması nedeniyle oluşan kütle kaybı, erozyon ve kavitasyon; (b) normal sıcaklık ve nem koşullarında oluşan çatlaklar, tuzun gözeneklerde kristalize olması, yapısal yükler ile donma ve yangın gibi değişik sıcaklıklara maruz kalma durumlarıdır (Mehta ve Monteiro, 2005).

Şekil 1.1’ de betonu yıpratıcı fiziksel etkiler bir arada gösterilmiştir (Baradan ve diğer, 2002).



Şekil 1.1 Betonun ve çimento harcının fiziksel nedenlerle bozulması (Baradan ve diğer., 2002).

Betonun kimyasal reaksiyonlar sonucu zamanla bozulması sürecinde, zararlı maddelerin (iyon veya molekül) çoğunlukla çevreden beton bünyesine taşınımı söz konusudur. Bazı hallerde zararlı maddeler betonun kendi bünyesinden de kaynaklanabilir. Bu durumda dahi zararlı maddeler reaksiyona girecekleri yere taşınırlar. Madde transferi olmadığı takdirde zararlı reaksiyonlar gelişemez. Dolayısıyla beton bünyesinde kimyasal reaksiyonların oluşması için ön koşul, taşınmayı sağlayan su veya su buharının varlığıdır. Zararlı maddeler ve betonun

reaktif bileşenleri arasındaki reaksiyon gerekli ortam oluşunca hemen başlar. Ancak genelde, beton bünyesi içinde veya yüzeyden içeriye taşınım hızı oldukça yavaş olduğundan, bazı reaksiyonların zararlı etkileri yıllar sonra ortaya çıkabilir (Baradan ve diğer., 2002).

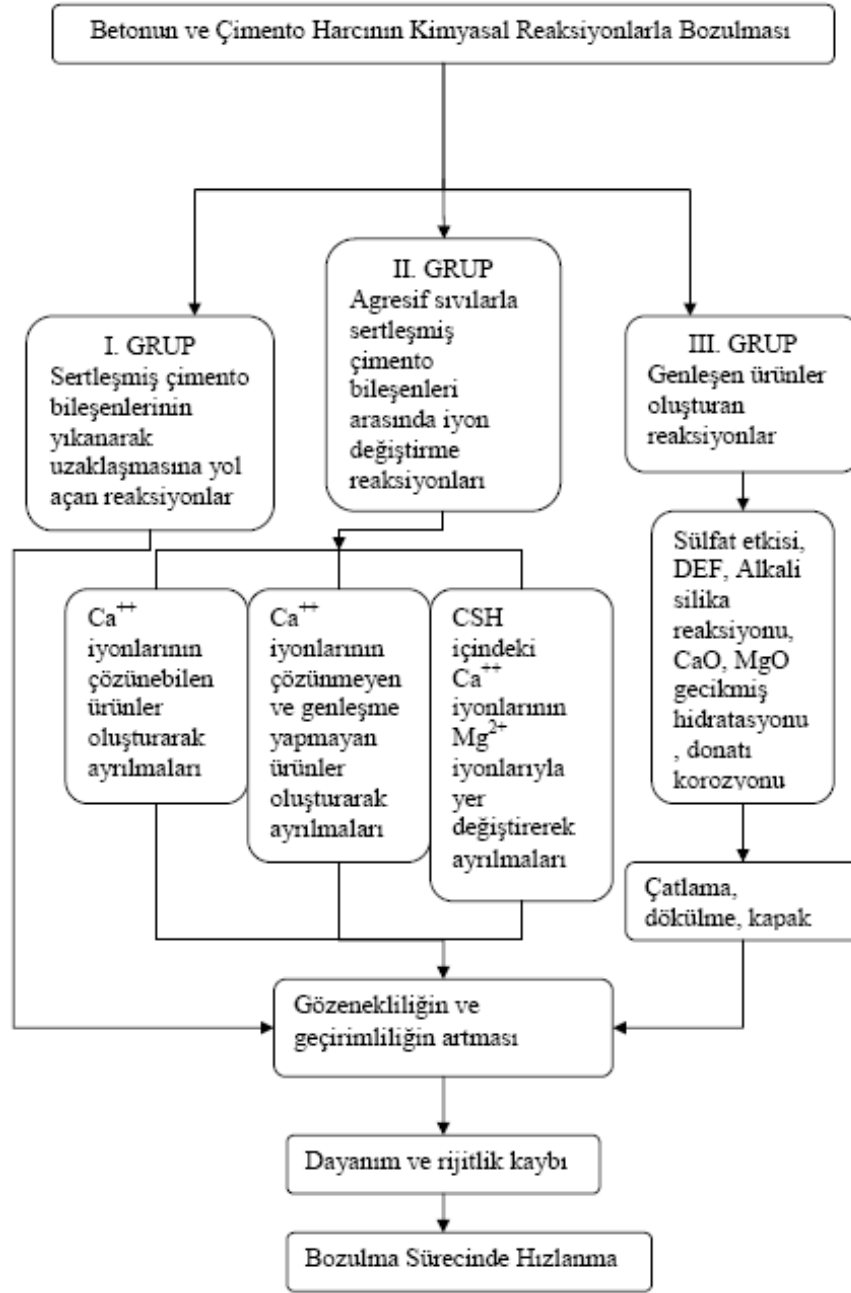
Betonun bozulmasına yol açan kimyasal reaksiyonlar üç grupta toplanabilir:

I. Grup reaksiyonlar düşük sertlikteki suların çimento hidrate bileşenlerini çözmesi ve yıkayarak beton bünyesinden uzaklaştırması şeklinde gelişir (Baradan ve diğer., 2002; Mehta ve Monteiro, 2005).

II. Grup reaksiyonlar agresif sıvıların hidrate çimento bileşenlerini çözmesidir. Reaksiyon ürünleri ya yıkanarak uzaklaştırılır veya suda çözünmeyen yeni bir yapı oluşturur. Asitlerin ve Mg^{2+} iyonu içeren suların oluşturdukları hasarlar bu tür reaksiyonlara örnektir (Baradan ve diğer., 2002; Mehta ve Monteiro, 2005).

III. Grup reaksiyonlar genleşen ürünler oluşturarak betonda hasara yol açarlar. Sülfat etkisi, MgO ve CaO gibi çimento bileşenlerinin hidratasyonları, alkali silika reaksiyonu (ASR), beton içine gömülü çelik donatının korozyonu bu tür bozulmaların en tipik örneklerdir (Baradan ve diğer., 2002; Mehta ve Monteiro, 2005).

Betonda gelişebilen kimyasal etkilenme mekanizmaları Şekil 1.2' de bir arada verilmektedir.



Şekil 1.2 Betonun ve çimento harcının bozulmasına yol açan kimyasal reaksiyon

Betonların kimyasal etkilere dayanıklılığı için geçirimsiz ve düşük su/çimento oranları ile üretilmesinin yanı sıra özel tip çimento (değişik puzolan katkı) kullanımında fayda vardır (Baradan ve diğer., 2002).

Betonun durabilitesi boşluk miktarı ve yapısı ile yakından ilgilidir. Boşluk miktarı ve boşlukların birbirleri ile olan bağlantıları arttıkça çeşitli zararlı malzemelerin ve suyun beton içine girmesi ve taşınımı kolaylaşır. Bunun sonucu olarak ise beton daha kolay hasar görür. Betonun durabilitesinin arttırılarak daha uzun servis ömürlerine sahip yapılar elde edilebilmesi için öncelikle betonun boşluk miktarının azaltılması gereklidir.

Betonun su/çimento oranının düşürülmesiyle birlikte betondaki kılcal boşluklar azalmaktadır. Kılcal boşlukların azalması sonucu ise betonun dayanımı artar ve geçirimsizliği düşer. Uygun özelliklerdeki puzolanik malzemelerin betonda kullanımıyla da boşlukların azaltılması mümkündür. Puzolan çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat oluşturur. Bunun sonucu betonun boşluk yapısı değişir.

Su/çimento oranı ve puzolanik malzemelerin etkilerinin incelendiği bir çalışmada (Şengül ve diğer, 2005b), çimentonun bir bölümü ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu veya uçucu kül ile yüksek yer değiştirme oranlarında yer değiştirilmiştir. Söz konusu çalışmadan elde edilen sonuçlar betonda uygun özellikte puzolan kullanımının su/çimento oranının azaltılmasına göre çok daha etkili olduğunu ortaya koymuştur. Su/çimento oranının düşürülmesi sonucu klor geçirimsizliklerinde 2 - 3 kat azalma elde edilirken puzolan kullanılan betonlardaki geçirimsizlik değerleri 10 ila 20 kat arasında azalmıştır. Betonda mineral katkı kullanımı sertleşmiş çimento hamurunun boşluk yapısını değiştirir; daha ince bir boşluk yapısı oluşur, toplam boşluk miktarı azalır ve daha yoğun bir içyapı elde edilir.

Yapılan bu çalışmada metakaolin kullanımının harçların dolayısıyla betonun bazı durabilite özelliklerine etkileri incelenmiştir. Metakaolinin, harç örneklerinin basınç dayanımı, gecikmiş etrenjit oluşumu, alkali silika reaksiyonu, klor geçirimsizliği ve kapilerite özellikleri üzerinde yaptığı etkiler araştırılmıştır.

Tez çalışması kapsamında deneysel çalışmalar iki grup altında toplanmıştır. İlk grup su/bağlayıcı oranı, harcın işlenebilirlik özelliğine göre değişiklik gösteren çimentonun kütlece % 0,0, 2,5, 5,0, 7,5, 10,0, 12,5, 15,0, 20,0 oranlarında karışıma ikame edilmiştir ve MK-1, MK-2, MK-3, MK-4, MK-5, MK-6, MK-7 ve MK-8 olarak adlandırılmışlardır. Diğer grup ise su/bağlayıcı oranı 0,5 değerinde sabit tutularak hazırlanmış ve yeterli işlenebilirliği sağlayabilmek amacıyla süper akışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Aynı ikame oranları için bu grupta yer alan karışımlar sırasıyla MK-1K, MK-2K, MK-3K, MK-4K, MK-5K, MK-6K, MK-7K ve MK-8K olarak adlandırılmıştır.

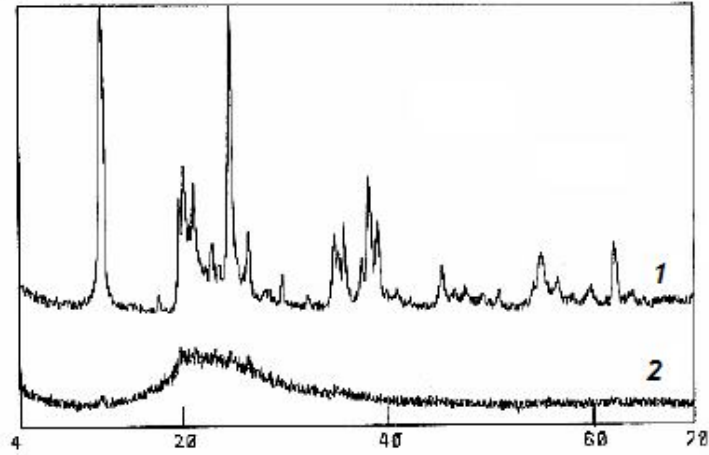
Çalışmanın **birinci bölümünde** durabilite ve mineral katkıların bazı durabilite özellikleri üzerindeki etkisinden kısaca bahsedilmiştir. **İkinci bölümde** tez çalışması kapsamında kullanılan metakaolin hakkında bilgi verilmiştir. **Üçüncü bölümde** içsel sülfat hasarı olarak adlandırabileceğimiz, son 25 yıldır gündemde olan gecikmiş etrenjit oluşumu ve bu oluşumu belirlemede kullanılan deneysel yöntemler anlatılmıştır. **Dördüncü bölümde** alkali agrega reaksiyonlarından alkali silika reaksiyonu oluşumu, tespiti ve yapılan deneysel çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. **Beşinci bölümde** betonların klor geçirimsizliği ve bunun sonucunda oluşan donatı korozyonu ve korozyon türleri hakkında kısa bilgi verilmiş, deneysel çalışmada kullanılan hızlandırılmış klor geçirimsizliği testi ile ilgili de kısa bir bilgi aktarılmıştır. Yine **Beşinci bölümde** beton ve harçların kapilerite ve su emme özellikleri ile ilgili bilgi verilmiştir. **Altıncı bölümde** basınç dayanımı ve basınç dayanımı deneyi kısaca özetlenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan malzemeler ve deney yöntemleri hakkında bilgilere **yedinci bölümde** yer verilmiştir. **Sekizinci bölümde** ise deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular irdelenmiş ve malzemenin incelenen durabilite özellikleri üstündeki etkileri göz önüne alınarak önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM İKİ

METAKAOLİN

Günümüzde, oldukça yaygınlaşan yüksek performanslı beton üretiminde puzolanik malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır. Beton üretiminde kullanılan puzolanların çoğu endüstriyel atık malzemeler veya yan ürünlerdir. Metakaolin (MK) ise, bu amaç için üretilen puzolanik bir malzemedir. Metakaolinin çimento harcında puzolan amaçlı olarak kullanımı, 1960'lı yıllara dayanır. 1990'lı yıllardan itibaren ise sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle beton üretiminde kullanımı yaygınlaşmıştır (Barness ve Bensted, 2001).

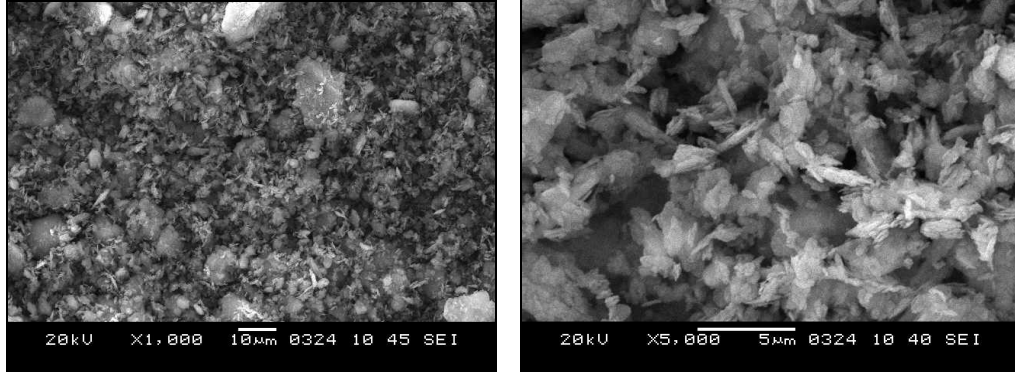
Saflaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesiyle üretilen MK, beyaz renkli, amorf yapılı bir alumina silikattır. 100–200 °C civarında kil mineralleri adsorbe sularını kaybederler. Kaolin kilinin dehidrolize olarak suyunu kaybettiği sıcaklık ise 500–900 °C aralığındadır. Bu sıcaklıkta kaolin bağlı suyunun %14'ünü kaybeder ve metakaoline dönüşür. Dönüşüm sonucunda, alumina ve silika tabakaları, kristal yapılarındaki düzeni kaybeder, böylece kaolin, amorf ve kimyasal olarak reaktif bir yapı kazanır. Şekil 2.1'de verilen kalsine edilmemiş kaolin kili ve metakaolinin XRD analizlerinde görüleceği üzere metakaolin oldukça amorf bir yapıya sahiptir. Kaolin kili aşırı miktarda sıcaklığa maruz kalırsa (900 °C üstünde) mullit fazı oluşur ve reaktif özelliğini kaybeder. Başarılı bir ısıl işlem uygulanması halinde yüksek oranda puzolanik özelliğe sahip amorf fazlı metakaolin elde edilir (Sun ve diğer., 2005).



Şekil 2.1 Kaolin kili ve metakaolinin tipik XRD analizleri
(1:Kaolin, 2:Metakaolin).

MK diğer puzolanlarda olduğu gibi kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimentoya ilave bağlayıcı özellik kazandırır. Yapılan çalışmalarda, MK' in çimento yerine uygun oranlarda kullanıldığında, mekanik özellikleri olumlu etkilediği (Poon ve diğer., 2006, Qian ve Li,2001, Sabir ve diğer., 2001), kılcal su emmeyi ve permeabiliteyi azalttığı (Khatib ve Clay, 2004), durabiliteyi arttırdığı (Gruber ve diğer., 2001, Bai ve diğer., 2003, Al-Akhras, 2006), çiçeklenmeyi kontrol etmede etkili olduğu ve özellikle alkali silika reaksiyonu oluşumunu azalttığı bulunmuştur (Ramlochan ve diğer., 2000, Aquino ve diğer., 2003). Ayrıca, MK kullanımı ile betonda kuruma rötresi ve sünmenin azaldığı rapor edilmiştir (Brooks ve Johari, 2003).

Şekil 2.2' de MK' in farklı büyütmelelerde çekilmiş mikro-fotoğrafları sunulmuştur. MK tanelerinin oldukça küçük, çubuksu şekilli köşeli formda olduğu görülmüştür. MK' nin çok ince tane boyutu ve çubuksu yapısı nedeniyle harç kıvamını azaltıcı etkisi bulunmaktadır.



Şekil 2.2 Metakaolinin 1000 ve 5000 kat büyütmedeki mikro-fotoğrafları.

Caldarone ve diğer. (1994), aynı su/bağlayıcı oranlarına sahip, % 5 ve % 10 oranlarında MK ve silika dumanı (SD) içeren betonlar üretmiş ve 365 güne kadar dayanım değerlerini belirlemiştir. Çalışma sonucunda MK içeren betonların SD içerenlere göre daha yüksek dayanımlar verdiği belirtilmiştir. MK' in benzer etkileri Wild ve diğer. (1996) tarafından da rapor edilmiştir. Araştırmacılar, MK' in betonun dayanımı üzerindeki etkisini üç ana faktöre bağlamıştır: filler etkisi, hidratasyonu hızlandırması ve puzolanik reaksiyon (Sabir ve diğer., 2001).

Qian ve Li'nin (2001), 426 kg/m^3 çimento dozajlı betonlarda %15' e kadar MK kullanarak yaptıkları çalışmada MK' in çökme değerine ve basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Karışım suyunu sabit tutarak hazırlanan betonlarda MK ilavesi ile betonda çökme değeri azalmaktadır. % 1 sabit oranda akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile MK ilavesi önemli ölçüde kıvam kaybına yol açmıştır. Ancak katkı %1,2'ye çıkartıldığında kıvam kaybı yaşanmamıştır. Bu durum uygun akışkanlaştırıcı oranının kullanımı ile MK' in kıvam sorunu yaşanmadan yüksek oranda kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca bu karışımların basınç dayanımları da MK ilavesi ile artmıştır.

Yukarıda özetlendiği üzere, MK' in çimento harcının dayanım ve dayanıklılığı üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalarda, genellikle belli kullanım oranına kadar MK' in olumlu etkisi gözlenmektedir. Yüksek kullanım oranlarında ise karışımın su

ihtiyacını arttırması nedeniyle MK' in performansı düşmektedir. Su ihtiyacı artışı etkili akışkanlaştırıcılar kullanılarak çözümlenirse daha yüksek oranlarda MK kullanımı mümkün olabilmektedir. Ancak ilave akışkanlaştırıcı kullanımının maliyeti arttırıcı etkisi de unutulmamalıdır.

2.1 Metakaolinin Tarihçesi

Meta öneki değişimi belirtmek için kullanılır. Bu önekin bilimsel olarak büyük ölçüde dehidrolize olmuş anlamında kullanılır. Metakaolin durumunda, değişiklik kilin üzerine ısı uygulaması tarafından belirlenen bir süre için ısı uygulanması sebebiyle kilin dehidroksilize olmasıdır. kil mineralleri adsorbe suyunun çoğunu yaklaşık 100-200⁰C' de kaybeder. Dehidroksilizasyon ile su kaybı 500-800⁰C aralığında meydana gelir. Minerallerin bu termal aktivitesine kalsinasyon denir. Dehidroksilizasyon sonrası sıcaklıkta, kaolinit iki boyutlu kristal yapısını korur ve bu ürüne metakaolin denir. Çimento ile yer değiştiren puzolan bir malzeme üretiminin sağlanması fazla sıcaklığı arttırmadan dehidrolizasyon uygulanmasıdır. İyi bir işlem sonrası amorf yapıda yüksek oranda puzolanik metakaolin elde edilir. Başarılı işlemin sonucunda düzensiz, son derece puzolanik amorf bir yapı oluşur. Metakaolin üretiminde ana unsur daha yüksek sıcaklığa maruz bırakmadan kaolinin dehidrolizasyonunu sağlamaktır. Bu sıcaklığın üzerinde sinterlenmeye ve mulit yapının oluşmasına sebep olur ve reaktif özelliğini kaybeder.

Metakaolin üretiminde hammadde girişi kaolin kilidir. Kaolin ince, beyaz, geleneksel porselen üretiminde kullanılmış olan kil mineralidir. Kaolin kelimesi Çince' de beyaz tepe anlamına gelir ve Avrupa'ya gönderilen ilk kaolinler sağlandığı Kaoling dağından türetildiği düşünülmektedir. Kaolinit kaolin kiline karşılık gelen mineralojik bir terimdir. Kaolinit mineral, kaolinin en yaygın parçası olarak, alüminyum disilikat hidrat, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ olarak tanımlanır. Kaolinler tüm kil mineralleri gibi, phyllosilikatlar sınıfındadır, yani: bir tabakalı silikat malzemedir.

Kaolinite çözümleri ve birikir zenginleştirilmiş sedimanter havzalarında gelişmez.

Kaolin mineral kil endüstrisinin en yüksek fiyatlı killerinden biridir. Geçmiş yüzyıllar boyunca geleneksel pazarı seramik endüstrisi olan kaolin artık egemen tüketim için kağıt endüstrisinde genel olarak dolgu, opaklaştırıcı olarak kullanılır ve yüksek uç kaplamalar için önemli bir girdidir. Ek olarak, kaolin refrakter, kauçuk, boya, plastik, kimya, eczacılık ve seramik endüstrilerinde küçük de olsa yer bulmaktadır.

Metakaolin, ilk kullanımı Brezilya' daki Jupia Barajı' nın imalatına dayanan puzolanik bir malzemedir. Kaolinit kilinin 650-800⁰C sıcaklıklar arasında kalsine edilmesiyle elde edilir.

Kil minerallerinin ısıtıldıklarıdaki davranışı mineralin yapısına, kristal boyutuna ve kristalin derecesine bağlıdır. 100⁰C sıcaklıktan sonra kilin adsorbe suyunu kaybetmesinin ardından kaolinit, yaklaşık 500⁰C' ye kadar su gibi hidroksil gruplarını kaybederek dekompoze olur. Eskiden amorf alümin ve silis karışımı olduğuna inanılan bazı orijinal kaolinit yapılarının kalıntılarının şimdi bazı kesin yapısal özellikleri sahip olduğu gösterilmiştir. Buna göre oluşan bu ürün metakaolin olarak adlandırılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda (>900⁰C), metakaolin ilerleyen reaksiyonlarda kristalin bileşenleri olan serbest silika ve mulite dönüşür.

Metakaolin kalsiyum hidroksiti çok hızlı bir şekilde tüketir ve 1980li yıllarda yapılan pek çok çalışmada lif katkılı kompozitlerde çimento matrisine eklenmesinin cam lifleri koruduğunu ortaya koymuştur.

1990lı yıllarda metakaolin betonda kullanımı yaygınlaşmış ve sülfat direncinin iyileştirilmesi, ASR genleşmesinin azaltılması çöçeklenmenin yok edilmesi gibi bir dizi beton özelliğinin iyileştirilmesinde etkin olduğu kaydedilmiştir.

Harç ve betonda puzolanik katkı olarak metakaolin kullanımı son yıllarda önemli ölçüde araştırılan bir konu haline gelmiştir. Bu araştırmaların çoğu durabiliteyi olumsuz yönde etkileyen bir hidrasyon ürünü olan portlanditin (CH) uzaklaştırılması üzerine odaklanmıştır. Portlanditin uzaklaştırılması, sülfat dayanımı ve ASR üzerinde önemli etkiye sahip olduğu gibi, çimento fazında portlandit ve metakaolinin oluşturduğu reaksiyonlar sonucunda dayanımın artmasına da sebep olur.

Metakaolin CH ile reaksiyona girebilecek aktif formda silika ve alümina içerir. Betonda ve harçta kil bazlı puzolanlar kullanmanın temel sebebi, malzemenin kolay ulaşılabilir olması ve durabiliteyi olumlu yönde etkilemesidir. Ayrıca, kalsine sıcaklığına ve kil tipine bağılı olarak kürün erken yaşlarında yüksek dayanımlar elde etmek de mümkündür. Erken yaşta kazanılan yüksek dayanım metakaolinin filler etkisinden ve çimentonun hidrasyonunu hızlandırmasından kaynaklanmaktadır. Bu etkiler daha sonra, metakaolin ve CH arasındaki puzolanik reaksiyon sonucu güçlenir. Puzolanik malzemelerin kullanımının yararları sadece yakın zamanda yapılmış binalarda değil, bugün hala ayakta durabilen M.Ö. 127 yılında inşa edilmiş olan Roma' daki Pantheon binasında da görülebilmektedir.

1960lı yıllarda Amazon havzasındaki rezervlerden temin edilen yaklaşık 300.000 ton metakaolin, çok daha pahalıya ithal edilen portland çimentosu ile öğütülmüştür. Yapılan yapıda yüksek reaktif agrega kullanıldığı halde yapının ASR etkisine maruz kalmadığı rapor edilmiştir (Saad ve diğeri., 1982). Betona metakaolinin katılması ASR direncini arttırmıştır.

2.2 Puzolanik Aktivite

19. yüzyılın son çeyreğinde, kaolinitin kalsinasyon koşulları ve metakaolinin karakteristik özellikleri önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bilindiği üzere, 600-900⁰C arası sıcaklıkta pek çok kil mineralinin termal aktivitesi, dehidroksilasyon sonucu kristal kafes yapısının parçalanarak yüksek reaktif geçiş fazı oluşturmaya bağlıdır. Kalsine killer betonda puzolan olarak kullanıldığında, Malquori, Turrizani ve yakın zamanda da DeSilva ve diğer. ve Dunster ve diğer. nin tartıştığı gibi kimyasal reaksiyonlar oluşur. Metakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) ve CH arasında çimentonun hidrasyonu ile oluşan ana reaksiyon suyun varlığında meydana gelir. Bu reaksiyon CSH jeline ek olarak, kalsiyum alümina hidrate ve alümina silikat hidrate bileşenler içeren kristalin ürünler de meydana getirir. Kristalin ürünler AS_2/CH oranına ve reaksiyon sıcaklığına bağlı olarak değişim gösterebilir. Buna ek olarak, ortamda serbest karbon mevcut ise karbo-alüminatlar da oluşabilir. Metakaolinin beton içinde yer alma oranı, sıcaklığa ve reaksiyon süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Pek çok araştırma üretim koşulları ve ana kilin saflığı açısından metakaolinin reaktivite seviyesini belirlemek ve hidrasyon reaksiyonunu incelemek için yapılmıştır. Ana kil (kaolin) doğal olarak saf olmalı ya da standart mineral işleme teknikleri ile rafine edilmelidir, aksi takdirde safsızlıklar seyreltici etki gösterebilir. Genellikle 700-800⁰C arasında olan termal aktivite sıcaklığı kritik bir önem taşır ve kullanılan mineralin temeline bağlı olarak değişmektedir. Kaolince zengin (%90) killer kullanılarak basınç dayanımı yüksek ve CH seviyesi düşük beton üretilebilir.

2.3 Kalsinasyon Sıcaklığı

Kilin kalsinasyon ya da yanma sıcaklığı açığa çıkan ürünün puzolanik reaktivitesini etkilemektedir. Kalsinasyon sıcaklığı 600-800⁰C arasındayken aktif bölge üretilir. Ambroise ve diğer. (1985) kaolinitin kalsinasyon sıcaklığını, 0,72 su/katı oranına sahip, 1:1' lik metakaolin-kireç harcının dayanımı üzerinde farklı kür sürelerine göre belirlemiştir. En yüksek dayanımı sağlayan optimum kalsinasyon sıcaklığı 700⁰C ve 3, 7 ve 28 gündür. Başka bir çalışmada 700⁰C' nin altındaki sıcaklıklarda metakaolinin daha fazla tortu bıraktığı ve daha az reaktif olduğu belirlenmiştir. 850⁰C' nin üstündeki sıcaklıklarda kristalizasyon oluşur ve reaktivite azalır (Ambroise ve diğer, 1985). Kaolinit genel olarak dönel fırınlarda kalsine edilir. Salvador ve Davies kalsinasyon süresini saniyelere indirmek için "flash kalsinasyon" yöntemini kullanmıştır. İşlem, hızlı ısıtma, kalsinasyon ve soğutma aşamalarından oluşur. Yazarlara göre bu işlem, diğer pek çok yöntemle göre hem zaman açısından olumludur, hem de daha reaktif özelliğe sahip metakaolin üretilir.

BÖLÜM ÜÇ

GEÇİKMİŞ ETRENJİT OLUŞUMU

Gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO) dışarıdan sülfat girişi olmaksızın, sertleşmiş betonda zaman içinde çeşitli nedenlerden dolayı etrenjit meydana gelmesi olarak tanımlanabilir. Meydana gelen etrenjit genleşme yaratır ve sertleşen betona zarar verir.

3.1 Gecikmiş Etrenjit Oluşumunun Tespiti ve Tarihçesi

Betonda etrenjit oluşumu çimento hidrasyonunun normal bir aşamasıdır. Normalde, meydana gelecek etrenjitin çok büyük bir kısmı taze betonda oluşacağından sertleşmiş betonda bir hasara yol açmaz. Ancak etrenjit, sonradan herhangi bir nedenle sertleşmiş betonda oluşursa, hasar yaratabilir. Beton bünyesine sülfat girişi halinde, bu sülfat hidrate olmamış C_3A , veya monosülfat ile reaksiyona girerek etrenjit meydana getirmektedir. Oluşan etrenjitin yarattığı genleşme etkisi, sertleşmiş betonda hasara yol açar. Ancak, dışarıdan sülfat girişi olmadığı durumda, etrenjitin sertleşmiş betonda oluşumu için bir sülfat kaynağı yoktur. Fakat bazı durumlarda, çok ender de olsa çimento üretiminde kullanılan aşırı SO_3 iç sülfat etkisi yaratabilir. Bu konuya dikkat çeken ilk çalışma Lerch tarafından 1945 yılında yayınlanmıştır (Stark ve Bollmann, 2000). Lerch'ten sonra geciken etrenjit oluşumunun sertleşmiş betonda yaratabileceği hasar ile ilgili 1965 yılında Kennerly bir araştırma raporu hazırlamıştır. Bu raporda Yeni Zelanda'daki Roxburgh Barajı soğuk derzlerinde çatlama ve beyaz bir birikinti meydana geldiği belirtilmiştir. Derzden alınan örnek incelendiğinde bu beyaz birikintinin etrenjit olduğu görülmüştür. Baraj yapısında dış sülfat kaynağı olmadığı ve buhar kürü de uygulanmadığı raporda belirtilmiştir. Yapılan mikroyapı incelemelerinde karakteristik olarak boşluklarda, çatlaklarda ve ara yüzeyde bol miktarda etrenjit kristali görülmüştür. Soğuk derzde genleşme hasarına etrenjitin bu bölgedeki lokal

kristalizasyonunun yol açtığı sonucuna varılmıştır (Day, 1992).

Yukarıda sözü edilen ilk saha örneklerinde buhar kürü etkisi yoktur ve tam olarak GEO kaynaklı hasar oldukları söylenemez. Çünkü çatlakların başka bir etkiyle oluşması ve etrenjitin sonradan bu çatlaklar içinde kristalize olması ihtimali vardır. Buhar kürü kaynaklı ilk GEO hasarı ise, 1980’li yıllarda Almanya’da ısıtma işlemi uygulanan öngerilmeli demiryolu traverslerinde gözlenmiştir. Buhar kürü uygulanan bazı demiryolu traverslerinde uzun kenara paralel çatlaklar görülmüştür (Şekil 3.1). İsveç’te de 1992-96 yılları arasında buhar kürü ile üretilen demiryolu traverslerinin 1999 kışında çatlamaya başladığı rapor edilmiştir. Yapılan incelemelerde; bu traverslerin üretiminde kullanılan çimentonun hem çok ince, hem de kimyasal kompozisyonunda yüksek oranda alkali ve sülfat içeren erken yüksek dayanımlı çimento olduğu belirlenmiştir. Buhar kürü (70°C) de uygulanan bu traversler, doğal olarak soğuk ve nemli servis koşullarında bulunmaktadır. Donma çözülme etkisinin de ortamda kuvvetli olduğu raporda belirtilmiştir. Üç ila yedi yılda hasar gören traverslerin mikroyapı incelemelerinde çatlak ve boşlukların etrenjit kristalleri ile dolduğu gözlenmiştir (Sahu ve Thaulow, 2004). Hasar gören örneklerin daha çok, hızlı küre giren (ön bekleme süresi az) örnekler olduğu ve/veya genellikle 70°C üstünde kür sıcaklığında tutulan örnekler olduğu görülmüştür. Buhar kürü sisteminin sıcaklığı homojen dağıtamamasından da bazı örneklerin daha çok hasar gördüğü tespit edilmiştir. Kür sıcaklığının en yüksek olduğu kür tüneli buhar giriş bölgesine yakın örneklerin daha çok hasarlı oldukları rapor edilmiştir (Scrivener ve diğer., 1999, Shayan ve Quick, 1992). 1990’larda Kuzeydoğu ABD’de de GEO kaynaklı olduğu öne sürülen demiryolu traversi hasarları kapsamlı olarak incelenmiştir. Bu yapı elemanlarından özellikle “cuma” günü üretilenlerde buhar kürü koşullarına özen gösterilmemesinden dolayı (kısa ön bekleme ve hızlı ısıtma) servis ömrü sırasında daha fazla hasar meydana geldiği gözlenmiştir (Scrivener ve diğer., 1999, Thomas ve Ramlochan, 2004). Bu saha örneğinden, kür koşullarının GEO’ya çok büyük etkisi olduğu sonucu çıkarılabilir.



Şekil 3.1 Hasar görmemiş travers (üst) ve görmüş traversler (alt).
(Hasarlı örnekte çatlaklar uzun kenara paralel olarak gelişmiştir.)

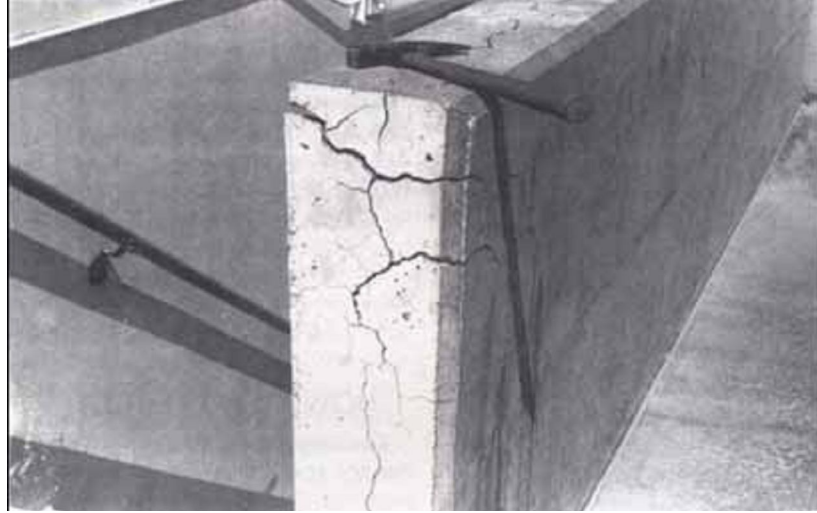
Finlandiya’da da 1964’ten beri buhar kürü kullanılmaktadır. Bu ülkedeki demiryolu traverslerinde de 1970’li yıllardan itibaren çatlama hasarı gözlenmeye başlanmıştır. Ancak bu hasarlar incelenirken, GEO’ nun yanı sıra, kullanılan agreganın alkali silika reaktivitesinin (ASR) de olduğu saptanmış ve agrega değiştirilmiştir. Donma çözülme etkisini azaltmaya yönelik hava sürükleyici kullanımı yoluna gidilmiştir (Skalny ve Locher, 1999, Thaulow ve diğer., 1996). Ayrıca buhar kürü ile ilgili bazı önlemler alınmıştır. Alınan önlemler sorunun büyük ölçüde çözülmesini sağlamıştır.

Yukarıda sözü edilen hasarlar ile ilgili ilk sistematik çalışma Heinz ve Ludwig tarafından yapılmıştır. Hasarlı örneklerden parça alarak yaptıkları çalışmada, demiryolu traverslerinin hasar görmesinde birincil neden olmasa bile GEO’nun hasarı arttırıcı payı olduğu belirlenmiştir. Sahadaki diğer etkilerin (ıslanma kuruma, donma çözülme, ASR...) hasar şiddetlerini arttırdığı sonucu elde edilmiştir. Ludwig vd. sahadaki bu durumu laboratuvar ortamında sistematik bir deney seti ile incelemiştir. Bu deneyde SO_3 oranı orta seviyede olan çimento harçları hazırlanmıştır. Harçların bir kısmı buhar kürü görmüş ve suda bekletilmiştir. Bu örneklerde uzun dönemde su içinde beklerken genleşme gözlenmiştir. Aynı çimento ile hazırlanan standart kürlü örneklerde ise uzun dönemde genleşme olmamıştır.

Buhar kürlülerdeki genişlemenin nedeni buhar kürü anında etrenjitin yerine monosülfat oluşumuna ve daha sonra sertleşmiş betonda monosülfatın tekrar etrenjite dönüşmesine bağlanmıştır (Odler ve Chen, 1996, Skalny ve Locher, 1999, Fu, 1996). Ancak, daha sonraki çalışmalarda farklı mekanizmalar da öne sürülecektir. Bu mekanizmalardan birisi de buhar kürü anında etrenjitin ayrışması ve açığa çıkan sülfatın CSH yapısı tarafından adsorbe edilmesidir. Daha sonra suda bekleme esnasında, adsorbe edilen sülfat CSH'dan ayrılarak boşluk suyu sülfat konsantrasyonunu artırmaktadır. Artan sülfat konsantrasyonu yeniden etrenjit oluşumunu sağlamaktadır.

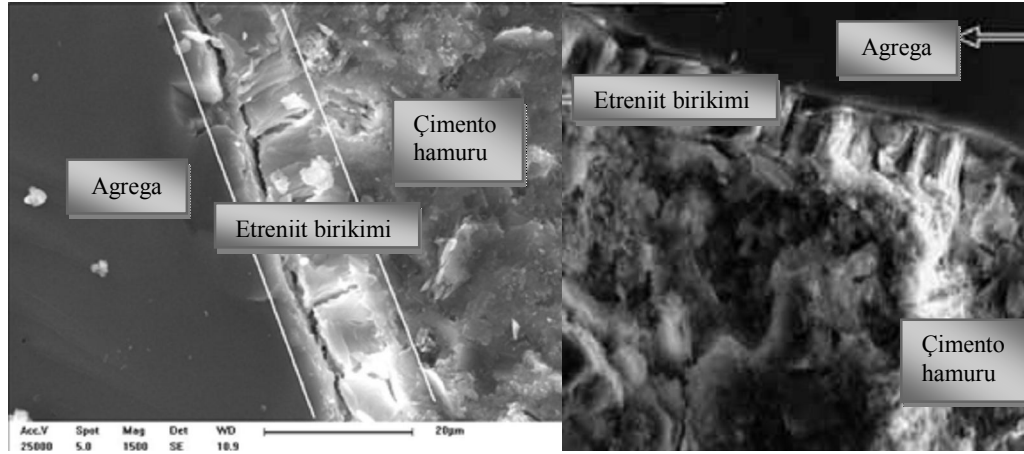
Heinz ve Ludwig (1987) yaptıkları teorik ve pratik incelemelerden; beton prefabrike demiryolu traverslerinde, prefabrike beton yollarda ve garaj döşeme kaplamalarında, köprü kirişlerinde, yerinde döküm kütle betonlarında ve yüksek sıcaklığa maruz beton yollarda GEO kaynaklı hasar görme potansiyeli olduğunu bildirmiştir. Bu araştırmadan hemen sonra beton yollardaki ilk GEO hasarı Amerika Iowa'da rapor edilmiştir (Skalny ve Locher, 1999).

Demiryolu traversi dışındaki prefabrik yapı elemanlarında da GEO kaynaklı hasar örneklerine rastlanmıştır. Örneğin, Şekil 3.2' de bir yeraltı otoparkı merdiveni, prefabrik panel elemanında GEO kaynaklı hasar görülmektedir (Shimada, 2005). Sekiz yıllık servis ömrü sonunda çatlak açıklıkları özellikle eleman ucunda 2 cm' ye kadar çıkmaktadır. Diğer kısımları mesnetli olduğundan genişleme serbest uçta en büyük hasarı yaratmıştır. Bu tür örneklerde özellikle açık havada bırakılan, zaman zaman ıslanan kısımlarda hasarın arttığı gözlenmiştir (Stark ve diğer., 1998, Heinz ve Ludwig, 1987).



Şekli 3.2 Sekiz yıllık bir yer altı otoparkı merdiveni prefabrik panel elemanında GEO kaynaklı hasar (Shimada, 2005).

Öngerilmeli prefabrik betonarme elemanlarda da GEO hasarına rastlanmaktadır. Bu tür elemanlarda kullanılan betonların, yüksek dayanımlı ve düşük poroziteli olmalarına rağmen hasar görmeleri önceleri üreticileri şaşırtmıştır. Özellikle öngerilmeli oluşmadığı kılıflı sistemlerde uç kenarlarda çatlama başlamakta ve bu durum öngerilme kaybına yol açmaktadır. Çatlaktan su sızarak donatı korozyonu gibi ikincil hasar verici etkileri de tetiklemektedir (Diamond, 1996). Kiriş elemanlarının orta bölgelerinde ise, hasar öngerilme uygulanan donatıya paralel çatlaklar şeklinde oluşmaktadır. Hasarlı örneklerin ilk mikroyapısal incelemelerinde genişlemenin betonun ileriki yaşlarında oluşan etrenjitten kaynaklandığı sonucuna varılmıştır (Diamond, 1996). Agregada çimento hamuru arayüzeyinde oluşan etrenjitin bu bölgede genişleme yarattığı düşünülmüştür (Şekil 3.3). Ancak, bu teşhisin doğru olmadığı, boşluk ve çatlaklarda gözlenen iri etrenjit kristallerinin çatlak oluşuktan sonra o bölgede kristalize olduğu, daha sonradan ortaya çıkmıştır.

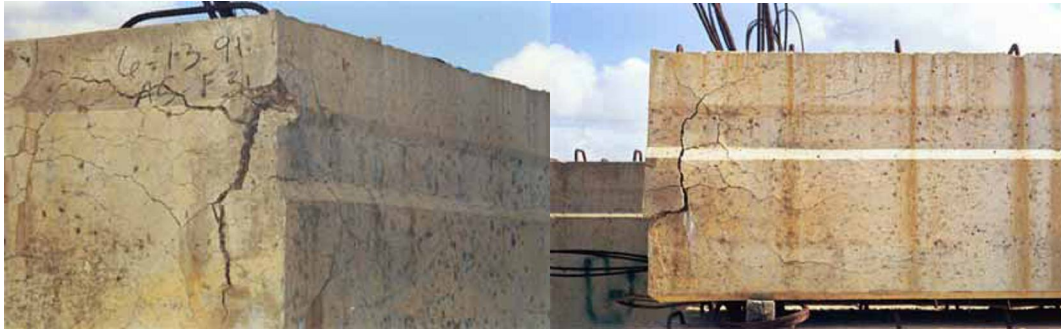


Şekil 3.3 İlk incelemelerde genişlemenin kaynağı olarak yorumlanan agrega çimento hamuru arayüzeyinde sonradan biriken ikincil etrenjit yapısı (Barbarulo ve diğer., 2005, Divet ve Pavoine, 2004).

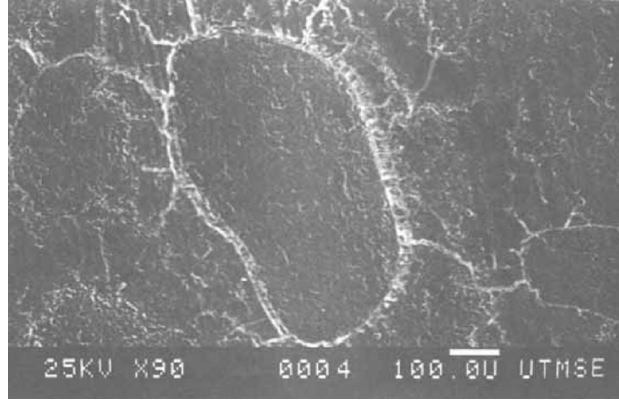
ABD'nin Kuzey Carolina eyaletinde 1962 yılında yapılan Brewer stadyumunun seyirci oturma platformları buhar kürlü hafif prefabrik beton elemanlardan oluşmaktadır. Sözü edilen prefabrik betonlarda 90'lı yılların başında çatlak oluşumu tespit edilmiştir. 1994'de bir futbol maçı sırasında seyircilerin oturduğu platform hasar görmüştür. Bazı platformlar bu kazadan sonra değiştirilmiştir. 1995'te 860 elemanın 375'i çatlama ve hasar nedeniyle değiştirilmek zorunda kalmıştır. Hasarlı örnekler üzerinde yapılan mikroyapısal incelemelerinde jelsi mikro-kristalin etrenjit oluşumlarına rastlanmıştır. Jel yapıdaki etrenjitin, tıpkı ASR jeli gibi su alarak şişebildiği ve genişleme yaratarak betona hasar verebileceği düşünülmüştür. Hasar gören örneklerle görmeyenler arasında yapılan sülfat analizinde önemli bir fark çıkmamıştır. Aslında potansiyel olarak oluşabilecek etrenjit miktarı benzerken, bazı örneklerde hasar görülmemesi elemanların duruş yeri ile ilişkilendirilmiştir. Özellikle seyircilerin oturduğu sıraların monte edildiği kanal şeklindeki döşeme kirişlerinin nemi üzerinde tuttuğu, derzlere de özen gösterilmediği vurgulanmıştır (Ozol ve Strand, 1999).

GEO kaynaklı olarak rapor edilen hasarlar içinde, ilginç bir örnek de Amerika'nın Texas eyaletinden verilebilir. Texas eyaletinde üretilen pek çok prefabrik öngerilmeli

betonarme elemanda ve kütle betonunda, üretimden yaklaşık 1 yıl sonra çatlama şeklinde hasar gözlenmiştir. Hatta köprü kirişi amaçlı üretilen prefabrik elemanların bazıları daha servise girmeden, stok sahasında bekletilirken çatlamaya başlamıştır (şekil 3.4). Hasarın nedenini anlamaya yönelik ilk incelemeler  kuruluşun (“Texas Department of Transportation – TxDOT”, “Wiss, Janney, Elstner & Associates - WJE for TxDOT”, “Iowa Department of Transportation – IDOT”) ortaklaşa hazırladığı bir raporda sunulmuştur (Thomas ve Ramlochan, 2004). Bu raporda hasarın temel nedeninin GEO olduğu vurgulanmıştır. Mikroyapı incelemelerinde çatlak ve boşluklarda çok miktarda etrenjit olduğu, agrega etraflarında boşluklar olduğu ve bunların bazılarının etrenjitle dolu olduğu rapor edilmiştir (şekil 2.5). Çimento hamurunda etrenjit birikimlerinin görüldüğü açıklanmıştır. İnce agreganın küçük bir kısmının rt içerdiği dolayısıyla reaktif olduğu ve ASR kaynaklı hasarın ihmal edilebilir mertebede bulunduğu bildirilmiştir. Yıllardır karayollarının kullandığı agregaların güvenli olduğu, reaktif olmadığı rapora eklenmiştir.

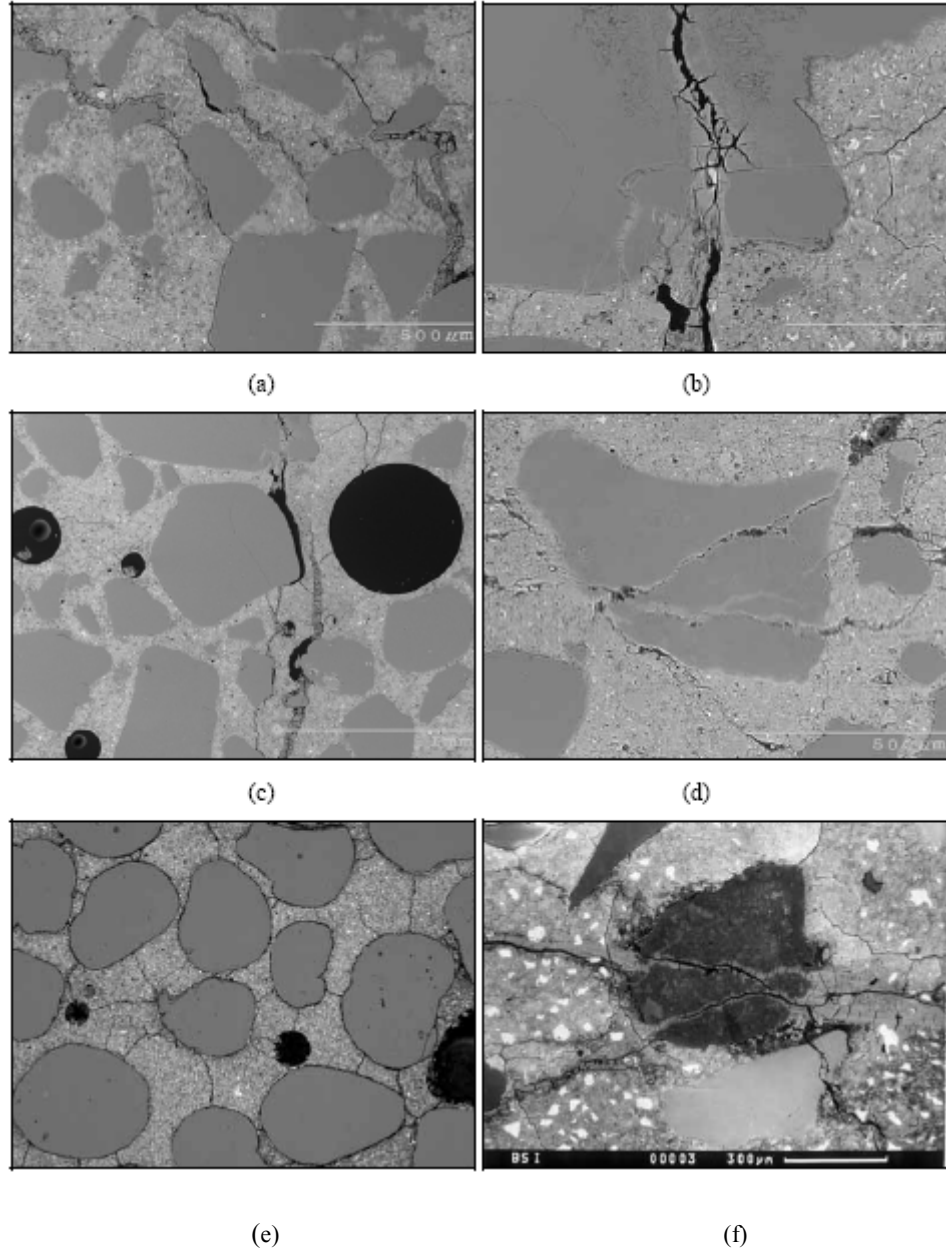


şekil 3.4 öngerilmeli köprü kirişlerinde ASR ve GEO’ nun birlikte meydana getirdiği hasar.



Şekil 3.5 Texas kırışleri ilk inceleme grubunun mikroyapısal inceleme mikrografi (iddia: genleşmenin kaynağı agrega etrafında yer alan GEO).

Yukarıda açıklanan raporun ardından ikinci bir inceleme farklı kuruluşlara (“National Institute for Standards & Technology – NIST”, “G.M. Idorn Consult”) yaptırılmıştır. Bu incelemede ise, hasarın asıl nedeninin ASR olduğu, hem iri hem de ince agreganın reaktif olduğu (ince için ASTM C1260 (2002)’ye göre 14 günlük genleşme $>0.2\%$) belirlenmiştir. Çatlakların reaktif agregadan hamura doğru geliştiği, çatlak ve boşluklarda etrenjit oluşumunun ASR hasarından sonra gerçekleştiği öne sürülmüştür. Reaktif agregaların heterojen dağılması nedeniyle, mikroyapıda gözlenen hasarın agregaların reaktifliklerine göre değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir. Bu duruma örnek olarak, taramalı elektron mikroskobu görüntüleri sunulmuştur (Şekil 3.6). Mikroyapı resimlerinde agrega etrafından (Şekil 3.6-a, 3.6-e) veya içinden (Şekil 3.6-b, 3.6-c, 3.6-d, 3.6-f) geçen çatlaklar ve bu çatlakların bazılarında yeniden kristalizasyonla biriken ikincil etrenjit oluşumları görülmektedir. Ayrıca, 56 adet hasarlı kırışin üretildiği çimentoların yüksek alkalili ($\sim 1.0\%$ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşdeğer}}$), 13 hasarsız kırışin üretildiği çimentoların ise düşük alkalili ($\sim 0.4\%$ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşdeğer}}$) olması, hasar nedeninin ASR olduğu ihtimalini kuvvetlendiren bir delil olarak sunulmuştur. Özetle genleşmede ASR’ nin öncü olduğu, sonradan oluşan etrenjitin çatlak, boşluk ve arayüzeyle kristalize olarak buralara yerleştiği yorumu yapılmıştır (Lawrence ve diğer., 1999).



Şekil 3.6 Texas kirişleri ikinci inceleme grubunun mikroyapı inceleme mikrografları (iddia: genişlemenin esas kaynağı ASR, çatlaklarda GEO sonradan meydana geliyor).

ASR' nin yüksek sıcaklık küründe hızlandığı ve alkalileri jele bağlayarak, boşluk suyu alkalinitesini düşürdüğü bilinmektedir. Boşluk suyu alkalinitesinin azalması etrenjit stabilitesini arttıran bir etkidir. Bu nedenle boşluk suyundaki sülfat konsantrasyonuna bağlı olarak, yeni etrenjit oluşumunu tetikler. Sözü edilen bu mekanizma, ASR ile birlikte GEO' nun meydana gelmesinin ve dolayısıyla betona

daha çok hasar vermesinin nedeni olarak gösterilmektedir. Çünkü boşluk suyu alkalinitesinin düşmesi, oluşacak etrenjit miktarını artırmaktadır. Betonun boşluk yapısı uygunsa, oluşan etrenjit genişletirici etki yaratabilir (Diamond, 1996, Shayan ve Ivanusec, 1996).

Yukarıda ayrıntılı biçimde açıklanan Texas örneği, mikroyapıda gözlenen her etrenjit kristalinin, hasarın birinci derece sorumlusu olamayacağını göstermektedir. Beton sertleştikten sonra; ıslanma kuruma, donma çözülme, ısınma soğuma, karbonatlaşma, ASR vb. etkilerle zayıflayabilir. Bu etkiler taze halde betonda zararsız şekilde oluşan etrenjitin ve monosülfatın stabilitesini etkileyerek hasar verici etrenjit formuna dönüşmesine yol açabilmektedir. Ancak sözü edilen durumun beton karışımındaki çimentonun özellikleri ve kür koşulları ile de yakından ilgili olduğu unutulmamalıdır. Sertleşmiş betonda oluşan her etrenjit genişletirici karakterde değildir. Etrenjitin oluşum koşulları, yeri, oluşum hızı, miktarı ve morfolojisi, genişletirici olup olmadığını belirlemektedir ve bu koşullar birlikte düşünülmelidir. Örneğin, mikroyapı incelemelerinde önceden oluşmuş çatlaklarda kalsit birikimleri de görülmektedir. Ancak bu birikimler hiçbir zaman çatlağın esas nedeni olarak kabul edilmez. Kalsit, sonradan kalsiyum hidroksitin bu boşluklarda yeniden kristalize olması ve karbonatlaşmasıyla meydana gelmiştir. Benzer şekilde, etrenjit de bulunduğu boşluktan başka bir yerde yeni bir boşluk oluştuğunda (çatlama) çözünüp, sonradan oluşan yeni çatlaklara boşluk suyu yardımıyla geçerek yeniden kristalize olabilmektedir (Idorn, 1992). Normal koşullarda bu değişim genişleme yaratmamaktadır.

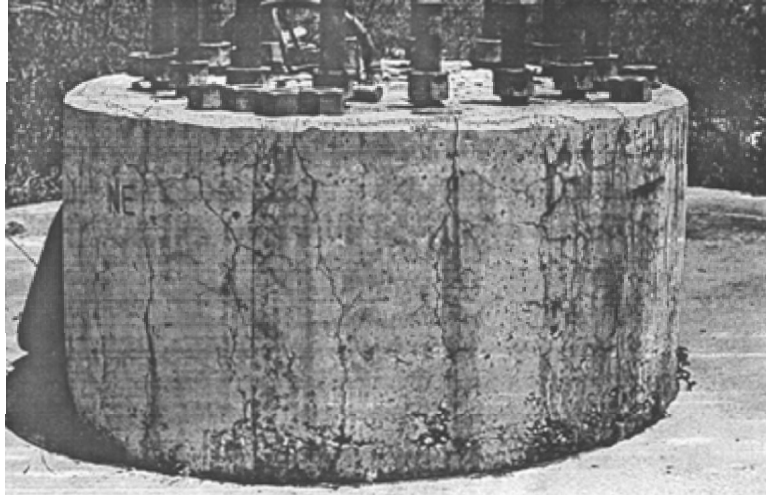
GEO sadece buhar kürü görmüş yapı elemanları için risk olarak kabul edilmemelidir. Buhar kürü görmeyen sadece iç ısı artan (kütle betonu, köprü ayakları, gökdelen temelleri...) veya dıştan ısınan (beton bacaların dış çeperlerinde, sıcak iklimlerde kullanılan selülozik lifli çatı örtü malzemelerinde, beton yol kaplamalarında...) beton ve betonarme yapı elemanlarında da GEO kaynaklı örnek mevcuttur (Diamond, 1996, Hill ve diğer., 2003, Yan ve diğer., 2001, Akman, 2003).

Sıcak iklimli Arap ülkelerinde, örneğin Suudi Arabistan'da, betondan imal edilmiş uçak pistinde buhar kürü görmemesine rağmen, çatlaklar meydana geldiği rapor edilmiştir. Bu çatlaklarda çok miktarda etrenjit birikimi olduğu belirlenmiştir. Çatlağın esas kaynağının termik gerilmeler olduğu, etrenjitin sonradan açılan çatlaklara dolduğu düşünülmektedir (Stark ve Bollmann, 1999, Stark ve diğer., 1998). İlk bakışta hasar kaynağı etrenjit oluşumu gibi görünse de aslında etrenjit birikimi, çatlağın nedeni değil sonucudur.

Buhar kürü görmemiş kütle betonu örneklerinde rastlanan hasarlarda genellikle ıslanma kuruma etkisiyle yapılarda hasarın çok daha şiddetli olduğu belirlenmiştir. Bu durum GEO'nun hasar meydana getirebilmesi için kılcal çatlak oluşturucu başka etkilere de ihtiyaç duyduğu izlenimini uyandırmaktadır (Lawrence, 1995b, Collepardi, 1999). Kılcal çatlak oluşturmanın yanında, nem etkisi de GEO potansiyelini arttırmaktadır. Bu konuda en sık karşılaşılan örneklerden biri köprü temelleri ve köprü sütunu ile kirişler arasındaki masif bağlantı (mesnet başlığı) elemanlarıdır. Fransa'da 1954-55'de yapılan bir köprü örnek olarak verilebilir (Şekil 3.7). Köprü uzunluğu 202 metre olup 5 açıklık bulunmaktadır. Boyutları 1,5x8.2x2,7m olan dört köprü başlığının birinde yoğun çatlak meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 3.7). Sözü edilen kütle betonu Ağustos 1954'de üretilmiştir. Yapılan teorik hesaplamalarda bu tür bir kütle elemanda çekirdekle dış kısım arasındaki sıcaklık farkının ilk üretildiği zamanda 50-60 dereceye çıkabileceği tespit edilmiştir. Bu sıcaklık farkı da muhtemelen kılcal çatlaklar yaratarak yapıya nem girişini kolaylaştırmıştır. Ayrıca meydana gelen yüksek sıcaklık, ilk oluşan etrenjiti bozarak GEO için zemin hazırlamış olabilir. Buhar kürü uygulanmayan ve reaktif olmayan agrega kullanıldığı bilinen bu köprü elemanında çatlaklar içinde bol miktarda etrenjit oluştuğu tespit edilmiştir (Divet ve Pavoine, 2004). Bir başka buhar kürü görmeyen ama hasar gören kütle betonu örneği Şekil 3.8'de görülmektedir. ABD'nin Texas eyaletindeki aydınlatma direği temelini hasar görmesinde ASR'nin de payı olduğu, ancak ikincil etrenjit oluşumuna da rastlandığı rapor edilmiştir (Lawrence ve diğer., 1999).

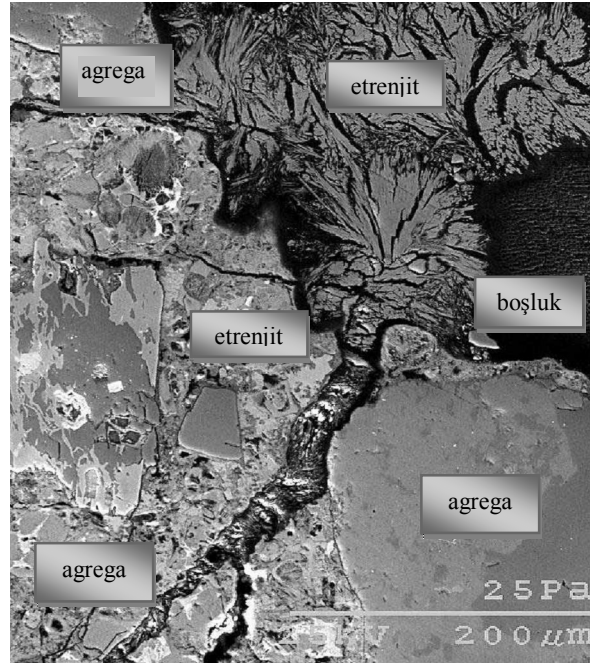


Şekil 3.7 Fransa'da betonarme köprü başlığında meydana gelen hasar (Divet ve Pavoine, 2004).



Şekil 3.8 Texas'ta aydınlatma direği temelinde ASR ve GEO hasarı.

ASR gibi donma çözülme etkisi de genellikle GEO ile birlikte görülmektedir. Donma çözülme etkisinin yarattığı mikroçatlaklar GEO için uygun zemin hazırlamaktadır (Diamond, 1996). Yapılan deneysel çalışmalarda buhar kürü geçirmiş örneklerin donma çözülme etkisinden normal kür edilen örneklerden daha olumsuz etkilendikleri görülmüştür (Shao ve diğer., 1997).



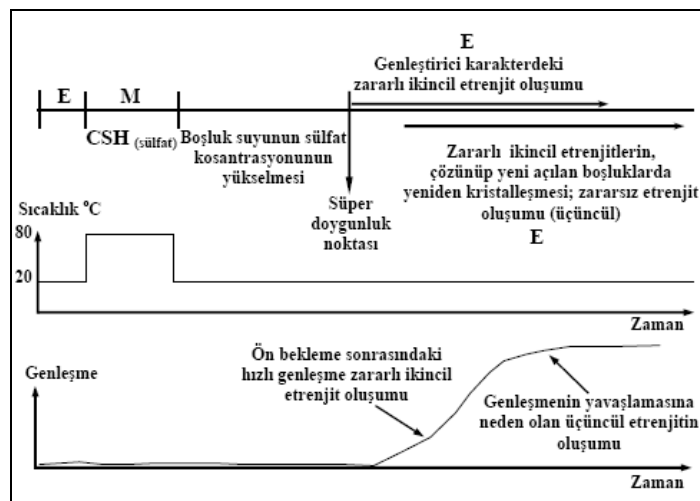
Şekil 3.9 Donma çözülme etkisi sırasında oluşan etrenjitin boşluklara birikimi ve boşluk hacmini azaltması.

Donma çözülme sırasında soğukta daha az stabil olan monosülfat etrenjite dönüşmektedir. Ayrıca ıslanma kuruma varsa monosülfat karbonatlaşarak da ayrılmakta ve etrenjite dönüşmektedir (Stark ve Bollmann, 1999, Gillot ve Rogers, 2003). Donma çözülme anında, hasar sönmüleyici olarak görev yapan boşluklar etrenjitle dolmakta, böylece donma sırasında buzun genişleceği hacim azalmaktadır (Stark ve diğer., 1993, Stark ve Bollmann, 1999). Etrenjit bu yolla hasarın şiddetini dolaylı olarak da arttırmaktadır. Şekil 3.9’da görüldüğü gibi, iğnemsiz yapıdaki etrenjit kristalleri boşluklarda yeniden kristalize olarak bu boşlukları doldurmaktadır. Böylece sürüklenmiş hava boşluklarının performansını azaltmaktadır.

Saha örneklerinde ortamda klor olması halinde, buhar kürlü örneklerin daha da kötü etkilendikleri rapor edilmiştir (Fu, 1996, Day, 1992). Ancak bu konuda yapılan çalışmalar, buhar kürlü görmüş örneklerde meydana gelecek GEO’ nun, genişleme yaratıp yaratamayacağını klor konsantrasyonunun belirlediğini göstermiştir.

Bu bölümde özetlenen saha örneklerinden de görüldüğü üzere, tek başına GEO kaynaklı hasarın görülmesi çok nadir olduğu belirtilmektedir (Day, 1992). Mutlaka ilave bir hasar mekanizmasının da birlikte olması ve içyapıda kılcal çatlak oluşturması, GEO hasarının ortaya çıkması için gerekmektedir (en azından ıslanma kuruma etkisi gibi). Genellikle diğer hasar mekanizmaları (ASR, donma çözülme, buz çözücü tuz) ilk çatlağın oluşmasına yol açmakta ve bu boşluklara ikincil etrenjit dolarak hasarı artırmada işlev görebilmektedir (Divet ve Pavoine, 2004). Hasarlı yapıların mikroyapı incelemeleri genellikle GEO oluşumunun geliştirici mekanizmasının yanlış yorumlanmasına yol açmıştır. Hasar çoğunlukla, agrega arayüzeyinde biriken ikincil etrenjit kristallerinin yarattığı kristal basıncına bağlanmıştır.

Bugüne kadar, GEO kaynaklı hasar Türkiye’de henüz rapor edilmemiştir. Ancak pek çok prefabrike yapı elemanında bu riskin olduğu açıktır. İzmir’de, bazı prefabrik elemanlarda (açıkta kalan dış kolonlarda) üretimden yıllar sonra, GEO kaynaklı olması muhtemel, çatlaklar görüldüğü bildirilmiş, fakat yeterli inceleme yapılmadığı için, bilimsel teşhis konulamamıştır.



Şekil 3.10 Buhar kürü geçirmiş örneklerde GEO'nun genişirme mekanizması (E: etrenjit, M: monosülfat).

3.2 Etrenjit Morfolojisi

Çimento hamurunun hidrasyonu esnasında oluşan etrenjit morfolojisi üzerine ilk sistematik incelemeler Mehta tarafından yapılmıştır. Mehta, etrenjiti oluşum alkalitesi, kristal boyutu ve genişleme yaratma karakterine göre iki gruba ayırmıştır. Tip I olarak adlandırdığı gruptaki etrenjit, düşük pH değerlerinde oluşmaktadır. Uzunluğu 10-100 mikrona kadar ulaşan iri kristaller şeklinde meydana gelmektedir ve genişletici karakterde değildir.

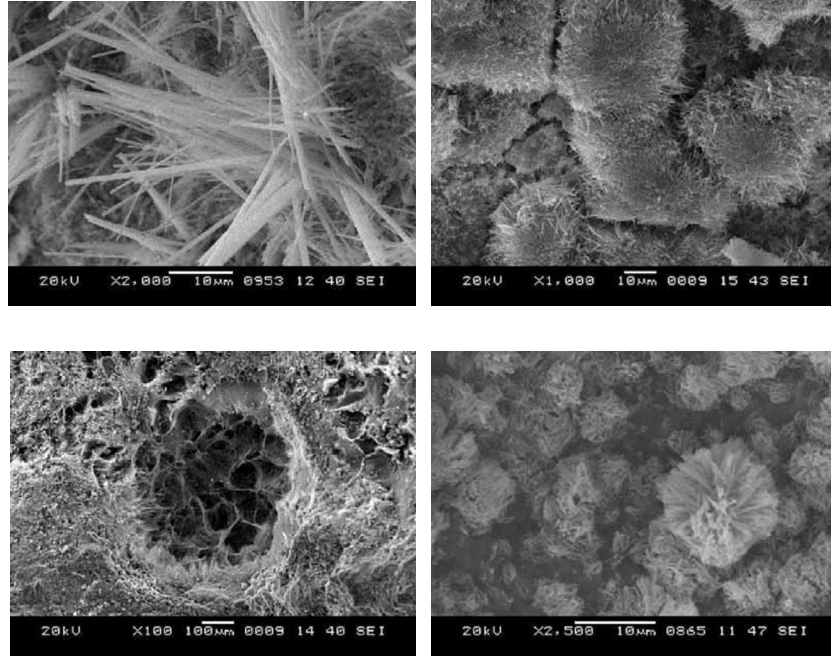
Tip II etrenjit ise çok daha küçük boyutlu 100-200 nm uzunluğunda ve çok miktarda oluşmaktadır. Mehta' ya göre bu etrenjit kristallerinin su emerek şişme özelliği de vardır. Genleştirici etkilerinin suyu emerek şişmeden kaynaklandığı görüşü, pek çok araştırmacı tarafından da desteklenmektedir (Stark ve Bollmann, 1999, Pavoine ve diğer., 2006a, Pavoine ve diğer., 2006b). Aslında daha önce açıklanan meta etrenjit yapısı bu teoriyi doğrulamaktadır. Etrenjite zayıf bağlı 20-26 molekül suyun hareketi kafes yapısında hacimsel değişimlere yol açabilir.

Genel olarak etrenjit morfolojisini etkileyen parametreler yedi ana grupta toplanabilir:

1. S/Ç oranı (Fu, 1996a),
2. Etrenjitin oluştuğu boşluk yapısı (Gruszczinski ve diğer., 1993),
3. Alümina kaynağının reaktivitesi (Odler ve Yan, 1994),
4. Boşluk suyundaki sülfat konsantrasyonu ve alkalinite,
5. Etrenjitin oluşum zamanı ve yaşı,
6. Etrenjitin oluşum mekanizması (çözelti içinden veya topokimyasal olarak oluşması ya da yeniden kristalizasyon),

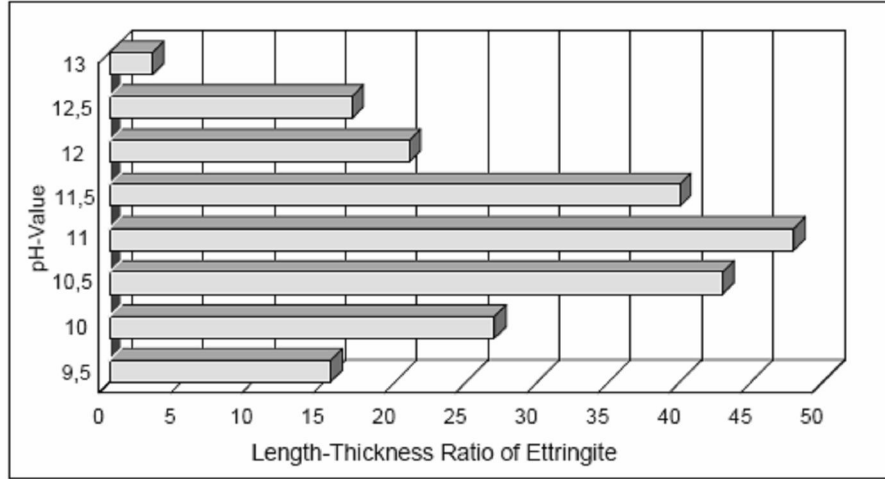
7. Etrenjitin oluşacağı ortam sıcaklığı ve nem durumu.

Etrenjit morfolojisini etkileyen parametrelerin çokluğu, farklı morfolojideki etrenjitlerin oluşum mekanizmalarının tam olarak açıklanamamasına neden olmaktadır. Literatürde gözlenen etrenjit morfolojilerinden bazı örnekler Şekil 3.11’de verilmiştir (Ormsby ve Liu, 2005).



Şekil 3.11 Farklı morfolojik formlara sahip etrenjit kristalleri.

Bu konuda yapılan çalışmalar genellikle sentetik etrenjit kullanılarak ve tek değişken değiştirilerek yapılmaktadır. Chartschenko’ nun oda sıcaklığında ortam pH’ ının sentetik etrenjitin morfolojisine etkisini incelediği çalışma örnek olarak verilebilir. Şekil 3.12’de görüldüğü gibi, farklı alkali ortamlarda sentezlenen etrenjitlerin boy/kalınlık oranları değişiklik göstermektedir. Alkalinite pH=10-12 arasında iken ince uzun etrenjit oluşmakta ve bu etrenjit XRD analizinde de görülebilmektedir. Alkalinite pH 12,5 ve üzerine çıkartıldığında etrenjit kristalleri kısalmakta ve mikro-kristalin yapıya dönüşmektedir. Bu yapıdaki etrenjitler X ışınları altında pik vermemekte, amorf, diğer bir deyişle jelsi yapıya dönüşmüş izlenimi vermektedir (Fu, 1996).



Şekil 3.12 Farklı morfolojik formlara sahip etrenjit kristalleri.

3.3 GEO Kaynaklı Genleşmeyi Etkileyen Faktörler

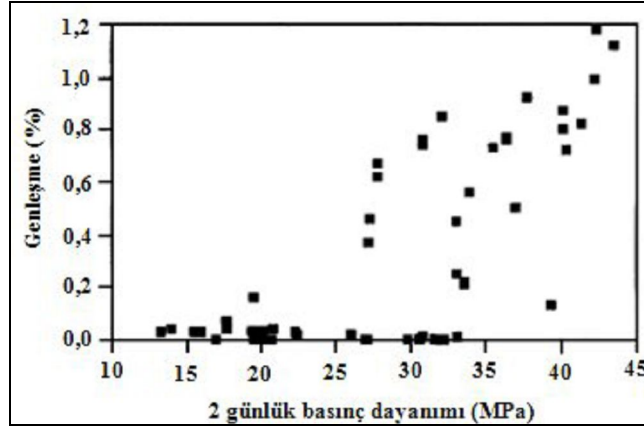
Çimento esaslı malzemelerde GEO kaynaklı genleşme riskini belirleyen pek çok faktör bulunmaktadır. Bunları, çimento harcını ve/veya betonu oluşturan malzemelerle ilgili iç faktörler ve üretim ve ortam koşullarını içeren dış faktörler olarak gruplandırabiliriz.

Tablo 3.1 GEO kaynaklı genleşme riskini belirleyen iç ve dış faktörler.

İç Faktörler	Dış Faktörler
Çimentonun SO ₃ içeriği	Buhar kürü koşulları (ön bekleme süresi, ısıtma hızı, kürde bekleme süresi, soğutma hızı)
Çimentonun C ₃ A içeriği	
Çimentonun alkali içeriği	
Çimentonun C ₃ S oranı	Buhar kürü sonrası bekleme koşulları (ortamın alkalitesi)
Çimentonun özgül yüzey alanı	
Agreganın petrografik kökeni	
Agreganın tane boyut dağılımı	Buhar kürü sonrasında bekleme sırasında fiziksel hasar yaratıcı etkiler (ıslanma-kuruma)
Çimento harcı veya betonun S/Ç oranı	
Çimento harcı veya betonun geçirimsizliği	
Mineral katkı kullanımı	
Lif katkı kullanımı	

3.3.1 GEO Kaynaklı Genleşmeyi Etkileyen İç Faktörler

Çimento kompozisyonu (kimyasal ve fiziksel özellikleri), su/çimento oranı ve geçirimsizlik, kum tipi GEO kaynaklı genleşmenin oluşma ihtimalini etkileyen iç faktörler arasında sıralanabilir. Ancak bunların içinde en önemlisi çimento kompozisyonudur. Günümüzde hem erken dayanımları artırmak hem de çimento sınıfını yükseltmek için çimentonun C_3S ve C_3A oranları artırılmakta, aynı zamanda çimentoların SO_3 oranı, alkali içeriği ve Blaine özgül yüzey değerleri artmaktadır (Arjunan, 2000, Glasser, 1996). Çimento kompozisyonunda meydana gelen tüm bu değişiklikler buhar kürü görmüş veya buhar kürü sıcaklığına benzer yüksek sıcaklığa maruz kalmış örneklerde GEO riskini artırmaktadır. Şekil 3.13’de farklı özelliklerdeki çimentolar ile hazırlanmış çimento harçlarının 2 günlük basınç dayanımları ile $90^\circ C$ buhar kürü sonrasında suda 2 yıl bekleme ardından meydana gelen genleşme miktarları arasındaki ilişki verilmiştir (Kelham, 2004). Şekilden görüleceği üzere genellikle çimentonun erken dayanımı arttıkça GEO kaynaklı genleşme potansiyeli artmaktadır. Ancak bazı örnekler çok yüksek erken dayanıma sahip iken genleşmemektedir.



Şekil 3.13 Buhar kürü görmüş örneklerin genleşme değerleri ile erken dayanımları arasındaki ilişki

3.3.1.1 Çimentonun Kimyasal Kompozisyonu

3.3.1.1.1 SO_3 Miktarı. Çimento kompozisyonunda SO_3 'ün iki kaynağı bulunmaktadır. Bunlar, klinkerden gelen bazı durumlarda belit fazında veya katı eriyik fazında dağılmış bulunan SO_3 ve çimentoya klinkerle öğütülerek sonradan ilave edilen alçıtaşıdır. GEO, genellikle yüksek oranda sülfat içeren (%4–5 SO_3) - yüksek sülfat içerikli klinkerlerden üretilmiş- çimentolarda görülebilmektedir. Lerch ve Ford tarafından 1948'de yayınlanan, Amerikan çimento ve klinkerleri üzerine yapılan araştırma sonucuna göre, klinker SO_3 içeriklerinin %0.5' den az olduğu, çimento toplam SO_3 içeriklerinin ise %2'den az olduğu ifade edilmektedir. 2000'li yıllarda ise bu rakamlar artma eğilimindedir. Özellikle kuru sistemde çalışan modern çimento tesislerinde atık sıcak miktarının artma ihtimalinin olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ASTM C 563 (2002)' ye göre, çimentonun optimum SO_3 miktarı sadece erken dayanımı arttırma hedefine göre belirlenmektedir. Bu da yüksek CA içeren çimentolarda GEO riski oluşturacak miktarda SO_3 kullanılmasına yol açabilir (Ludwig ve Rüdiger, 1993, Zhang ve diğer., 2002a).

Klinkerden gelen SO_3 miktarının çok olması halinde araştırmacılar “*Buhar kürü olmadan, hidrasyondan sonra klinkerden SO_3 'ün yavaşça salınmasıyla GEO meydana gelebilir mi?*” sorusunu kendilerine yöneltmiş ve bu konuda çok sayıda inceleme yapılmıştır. Elde edilen bulgular, beklenenin aksine klinkerden gelen SO_3 ' ün çözünürlük farkının çok fazla olmadığını göstermiştir (Kelham, 1996, Taylor, 1999, Yang ve diğer., 2002, Herfort ve diğer., 1999, Tennis ve diğer., 1999, Michaud ve Suderman, 1999, Taylor, 2004). Klinkerden gelen sülfatlar genellikle alkali sülfat formunda olduğundan çözünürlükleri yüksektir. Örneğin, alkali sülfatlardan arkanit (K_2SO_4), aphtalit (K_2NS_4), ender olarak tenardit (Na_2SO_4) ve kalsiyum langbeyit (KC_2S_2) su ile çok hızlı reaksiyona girebilen sülfat kaynaklarıdır (Taylor, 2004). Bu teoriyi destekleyen, hidrasyonun ilk 24 saatinde, klinkerden gelen SO_3 ' ün tükendiğini gösteren çalışmalar mevcuttur (Stark ve Bollmann, 1999, Herfort, 2004). Burada çimentonun çok ince öğütülmesinin, klinkerden gelen belit içine hapsolmuş SO_3 ' ün fiziksel açıdan serbest kalmasını sağladığı dikkate alınmalıdır. Özetle buhar kürü olmaksızın klinkerden gelen SO_3 ' ün genleştirici etkisi olmadığı söylenebilir

(Taylor, 1999, Michaud ve Suderman, 1999, Michaud ve Suderman, 2004).Kurdowski (2002), klinker içinde anhidrit bulunmasının genleşme riski ortaya çıkarabileceğini gösteren bir çalışma yapmıştır. Ancak klinkerde anhidrit bulunabilmesi için alkalilerin sülfatı bağlamaması gerekmektedir. Diğer bir deyişle, sadece klinker alkali seviyesi çok düşük olduğu durumlarda yavaş çözünen anhidrit oluşabilir. Kurdowski (2002), klinkerde anhidrit oluşturabilmek için alkali miktarını (%0,3 eşdeğer sodyum oksit) aşırı azaltmıştır. Ancak laboratuvar ortamında sentezlediği klinkerin özellikleri pratikte kullanılan çimentolara benzemediği için, elde ettiği sonuçları tüm çimentolar için genellemek doğru değildir.

Öte yandan çimentodaki SO_3 'ün diğer kaynağı olan alçıtaşında da geç çözünme problemi yoktur. Öğütme esnasında alçıtaşı dehidrate olarak hemihidrata veya γ -kalsiyum sülfata (çözünebilir anhidrit) dönüşebilir. Hemihidrat ve γ -kalsiyum sülfat, normal anhidritten daha hızlı reaksiyona girebilmektedir (Taylor, 2004).

Tablo 3.2 Farklı SO_3 kaynakları ve bu kaynaklardan çimentoya katılan SO_3 'ün özellikleri (Glasser, 2004, Taylor, 1999, Michaud ve Suderman, 1999).

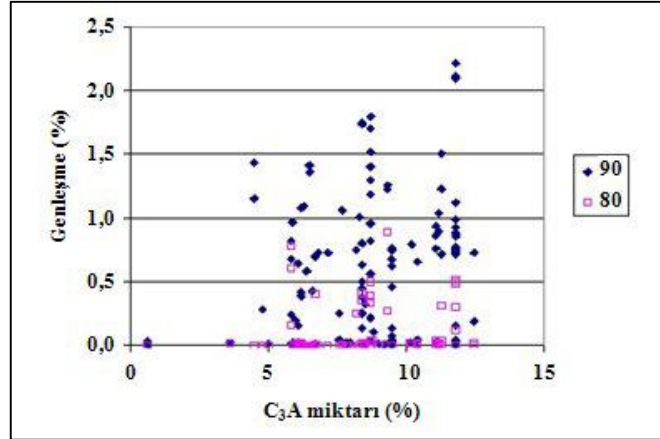
Kaynak	Çözünme Hızı	Tespiti
(K, Na) ₂ SO ₄ klinker taneleri içinde	Hızlı	Kimyasal ekstraksiyon yöntemleri veya optik mikroskopla klinkerde
CaSO ₄ .2H ₂ O (alçı taşı) ve CaSO ₄ .1/2H ₂ O (hemihidrat)	Klinker ile birlikte öğütüldüğü durumda hızlı	3-28 günde tükenir
CaSO ₄ (anhidrit) ve belit içindeki SO ₄ ⁻²	Klinkerde bulunuyorsa yavaş, ancak anhidritin suyla reaktivitesi çok değişken	Belit tanesi hidrate olduktan sonra içindeki SO ₄ ⁻² reaksiyona girebilir

Sülfata dayanıklı çimentolar hariç diğer çoğu çimento tipinde C_3A miktarı SO_3 miktarından daha fazladır. Bu açıdan bakıldığında hasar şiddetini belirlemede SO_3 miktarı anahtar rol oynamaktadır (Stark ve Bollmann, 1999).

SO₃ oranlarına sahip çimentolarla hazırlanan harçların buhar küründen sonra genişmemesi birkaç nedene bağlanabilir. İlki, C₃A oranı düşük olabilir. İkincisi ise, boşluk suyunda çok fazla sülfat varsa, etrenjit buhar kürü anında stabilitesini koruyabilmektedir (Lawrence, 1995b).

3.3.1.1.2 C₃A Miktarı. Çimento bileşenlerinden C₃A en önemli etrenjit kaynağıdır. GEO kaynaklı genişleme C₃A oranı düşük çimentolarda gözlenmemiştir (Kelham, 1996). C₃A'nın miktarının yanında tane boyut dağılımı (incelik) reaktifliğini etkilemektedir (Fu, 1996).

Kelham (1996), çimentodaki C₃A miktarının buhar kürü (80 °C ve 90 °C) kaynaklı genişleme üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik olarak yaptığı çalışmada Şekil 3.14'deki sonuçları elde etmiştir. Genişleme ile C₃A miktarı arasında bir ilişki bulunamamıştır. Aslında bir ilişki görülememesi normaldir çünkü çimentoların incelik, SO₃ oranı ve alkali içeriği gibi özellikleri de değişkendir.



Şekil 3.14 Buhar kürü sonrası genişleme ile çimentonun C₃A içeriği arasındaki ilişki (Kelham, 2004).

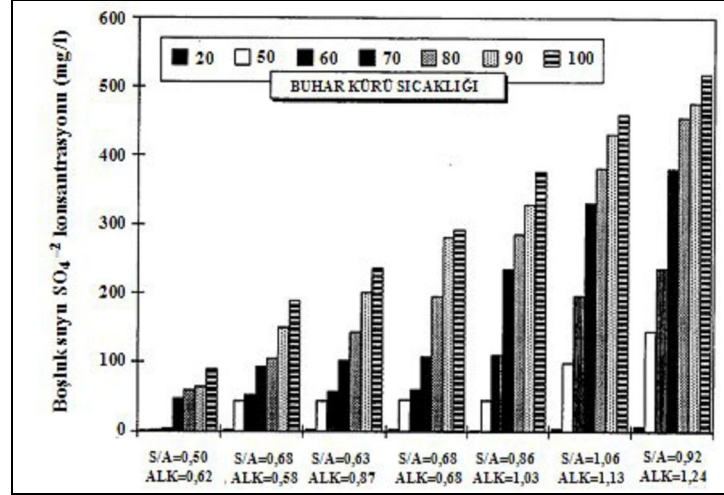
Pek çok araştırmacıya göre, C₃A'nın ve SO₃'ün çimentodaki miktarı GEO açısından çok fazla bir anlam ifade etmemektedir. Bu araştırmacılara göre, SO₃/Al₂O₃ ve (SO₃)²/Al₂O₃ oranları çimentoların GEO kaynaklı genişleme

potansiyelini belirlemede daha önemli parametrelerdir. Day (1992)'ye göre, SO_3/Al_2O_3 oranının 0,7'den fazla olması veya $(SO_3)^2 / Al_2O_3$ oranının 2,0'den fazla olması çimentoları GEO açısından riskli sınıfa sokmaktadır (Day, 1992). Heinz ve Ludwig (2004)'de aynı sınır değerleri tekrarlamıştır (Kelham, 1996). Buradaki Al_2O_3 miktarı C_3A 'dan gelen aktif alüminayı temsil etmektedir. Odler ve Chen (1996), SO_3/Al_2O_3 molar oranı için 0,55 sınırını vermiştir. Ayrıca Odler ve Chen (1996), orandan çok hem C_3A hem de SO_3 miktarının yüksek olmasının GEO riskini arttırdığını vurgulamaktadır.

3.3.1.1.3 Alkali Miktarı. Çimento kompozisyonundaki alkali varlığı, boşluk suyu alkalinitesini değiştirerek etrenjitin stabilitesini etkilemektedir (Stark ve Bollmann, 1999). Normal bir Portland çimentosunda eşdeğer Na_2O miktarı %0,8 ile %1,2 arasındadır. Bu durumda düşük S/Ç oranlı çimento hamurunda boşluk suyu pH değeri 13,5-14 arasındadır. Bu derece yüksek pH değerlerinde mevcut mikrokristalin etrenjit stabilitesini korurken, yeni etrenjit oluşumu mümkün değildir. Etrenjit oluşumu için pH'ın etrenjitin stabil olduğu değerlere düşmesi gerekir.

Çimentonun alkalinitesinin GEO mekanizmasındaki etkinliği buhar kürü dönemi ve sonrasındaki bekleme döneminde ayrı ayrı düşünülmelidir. Buhar kürü anında sıcaklık artışı ile ilk oluşan birincil etrenjit çözünmektedir. Bu aşamada boşluk suyu alkalinitesinin yüksek olması etrenjit çözünürlüğünü arttırmaktadır. Yani etrenjitin çözünmesi ile boşluk suyuna salınan sülfat miktarı artmaktadır. Bu konuda yapılan deneysel çalışmalar sıcaklık ve alkali artışı ile boşluk suyu sülfat konsantrasyonunun arttığını göstermektedir (Şekil 3.15) (Day, 1992, Kelham, 1996, Glasser, 1996). Şekil 3.15' de görüldüğü gibi SO_3/Al_2O_3 oranı artışı da boşluk suyu sülfat konsantrasyonunu arttırmaktadır. Boşluk suyuna salınan sülfat bilindiği üzere monosülfat yapısını oluşturmakta veya CSH yapısına adsorblanmaktadır (Divet ve Randriambololona, 1998). Bu durum alkalinitesi yüksek çimentolarda GEO riskinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Öte yandan soğuma sonrasında örneklerin bekleme koşulları boşluk suyu alkalinitesini değiştirebilmektedir. Bu aşamada boşluk

suyunun alkalinitesini koruması etrenjitin yeniden oluşmasını engellemektedir. Diğer bir deyişle, yüksek alkalili çözeltilerde bekletilen örneklerde GEO'ya rastlanmaz. ASR veya normal suda bekleyerek kireç kaybetme, sızma durumunda etrenjit oluşma riski artar (Diamond, 1996).



Şekil 3.15 Buhar kürü işleminden sonra çimento hamuru boşluk suyu SO_4 konsantrasyonunun farklı çimento ompozisyonları için değişimi (Day, 1992) (S/A: SO_3/Al_2O_3 oranı, ALK: eşdeğer alkali %'si).

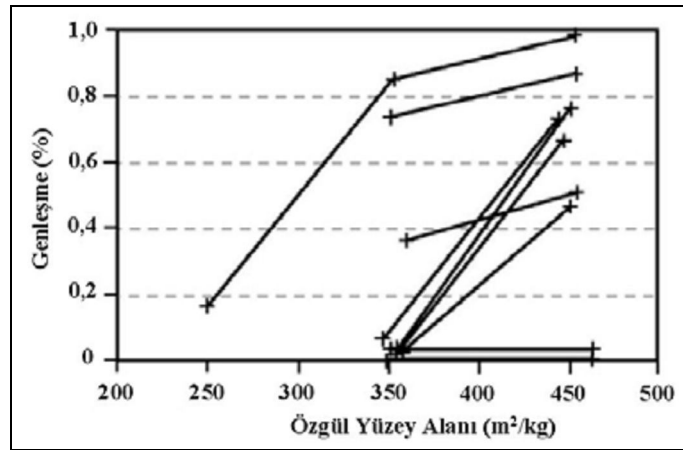
3.3.1.1.4 C_3S Miktarı. Brown ve Bothe (1993)'ye göre çimentonun C_3S miktarı oluşturacağı CSH jeli ile ilişkili olduğu için GEO potansiyelini arttırır. Çünkü CSH buhar kürü anında etrenjitin stabilite kaybı ile boşluk suyuna salınan sülfatı adeta bir sünger gibi adsorblamaktadır. Soğuma safhasında yavaşça geri salınan sülfatın artması da GEO riskini arttıracaktır. Ancak, mekanizma içinde daha farklı etkiler de (geçirimsizlik, 100 C_3A ve SO_3 miktarı ...) bulunduğundan tek başına C_3S artışının GEO'ya yol açacağını iddia etmek doğru değildir (Kelham, 1996).

3.3.1.2 Çimentonun Özgül Yüzey Alanı

Çimentonun kimyasal özelliklerinin incelendiği bir önceki bölümde tüm fazların tam olarak reaksiyona girebildiği düşünülmektedir. Oysa, çimento inceliği fazların reaktivitelerini etkilemektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar çimento inceliğinin

arttırılmasının GEO potansiyelini arttırdığını göstermiştir (Kelham, 1996, Fu ve Beaudoin, 1996c).

Kelham (1996), farklı özgül yüzey alanlarına sahip çimentolar kullanarak hazırladığı deney programında çimento harçlarının 90°C buhar kürü sonrası 1000 günlük genleşmelerini ölçmüştür. Elde ettiği sonuçlar Şekil 3.16' da verilmiştir. Genel olarak çimentoların özgül yüzey alanı arttıkça GEO kaynaklı genleşmeleri de artmıştır. Bu artış çimento tipine göre farklılık gösterebilmektedir.



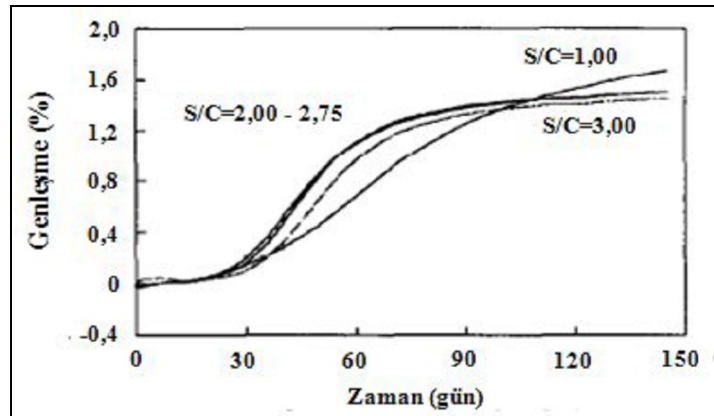
Şekil 3.16 Özgül yüzey alanı ile GEO kaynaklı genleşme arasındaki ilişki.

3.3.1.3 Agregası Tipi, Boyutu ve Miktarı

GEO'yu beton ve/veya çimento harcı üretiminde kullanılan agreganın miktarı, petrografik kökeni ve boyut dağılımı da etkilemektedir. Aslında GEO açısından inert olan agreganın bu mekanizmadaki etkisi fizikseldir. ASR' de olduğu gibi agreganın reaksiyona katılma durumu yoktur. Çimento hamurunda meydana gelen şekil değişimleri ve gerilmeler, agregaya arayüzey yoluyla aktarılmaktadır. Ara yüzey özelliklerindeki farklılıklar içyapıda çeşitli etkiler nedeniyle oluşan çatlakların yön ve miktarını değiştirmektedir. Böylece agregası tipi dolaylı olarak GEO kaynaklı genleşmeleri etkilemektedir. Benzer şekilde buhar kürü ve ısınma gibi termal etkilere maruz betonda, agregaların farklı termal genleşme katsayıları genleşme mekanizmasında farklılıklar oluşturmaktadır. Agregası bulunmayan çimento hamuru,

agrega olarak kum içeren çimento harcı ve iri agrega barındıran betonun, GEO kaynaklı genleşme potansiyelleri karşılaştırıldığında şu sonuçlar elde edilmektedir: Genleşmenin ortaya çıkış sırasına göre dizildiğinde ilk beton, sonra çimento harcı ve en son çimento hamuru gelmektedir. Ancak, nihai genleşme miktarları karşılaştırılırsa bu sıralama tersine dönmektedir (Lawrence, 1995a). Tabii ki burada S/Ç oranı, çimento ve agrega özellikleri vb. pek çok parametre değiştirilerek farklı sıralamalar elde edilebilir. Ancak burada gösterilmek istenen agrega miktarının GEO mekanizmasındaki görevidir. Agrega miktarı arttırıldığında etrenjit oluşma potansiyeli azaltılacağından nihai genleşme azalacaktır. Öte yandan ilk genleşmenin ortaya çıkışı agrega kullanımı ile artan geçirimliliğin bir sonucu olarak gösterilebilir.

GEO kaynaklı genleşmeler çoğunlukla çimento harcında incelenmekte olup, F_u ve diğerlerinin (1997) yaptıkları deneysel çalışma örnek olarak gösterilebilir: Aynı S/Ç oranında hazırlanan harçların kum/çimento yoğunlukları değiştirilmiştir. Çimento olarak GEO potansiyeli olduğu bilinen bir çimento kullanılmıştır (Blaine değeri $568 \text{ m}^2/\text{kg}$, $\text{C}_3\text{A} \%10,3$, $\text{SO}_3 \%4,1$). Bu harç örnekleri, buhar kürü sonrası suda bekletilirken genleşme ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.17). Harçtaki kum yoğunluğu arttıkça genleşmeler önce artmış, daha sonra zaman içinde kum/çimento oranı düşük (çimentoca zengin) örnekler diğerlerini yakalayıp geçmiştir. Farkın nedeni de aslında kuvars kumu kullanılması ve bu kumun termal genleşme uyumsuzluğu nedeniyle önceden geçirimliliği arttırmasıdır. Ancak zaman içinde bu kumdan daha az içeren örneklerin de içyapılarına su ulaşınca genleşme ortaya çıkmaktadır.

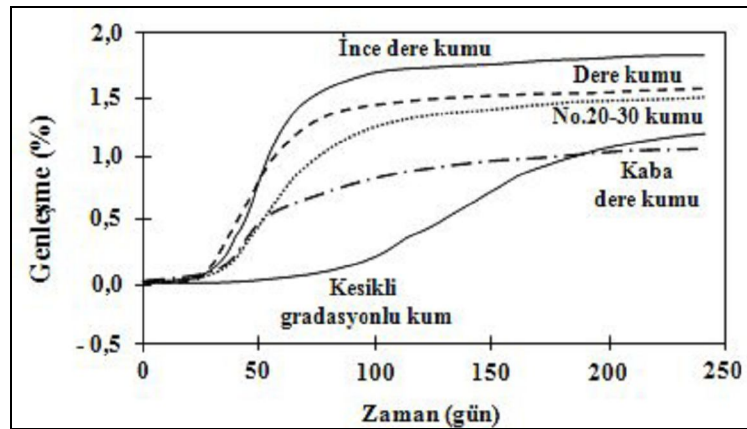


Şekil 3.17 Agrega miktarının çimento harcı genleşme değerlerine etkileri (S/C: kum/agrega oranı).

Fu ve diğeri (1997), farklı tane boyut dağılımlarına sahip kumlarla yaptığı çalışmada çimento harcı örneklerinin, GEO potansiyellerini araştırmıştır. Kumların tane boyut dağılımları Tablo 3.3’ de verilmiştir. Tüm örneklerde GEO potansiyeli olan bir çimento (Blaine özgül yüzeyi $568 \text{ m}^2/\text{kg}$, C_3A %10,3, SO_3 %4,1) kullanılmıştır. Hazırlanan çimento harçlarının S/Ç oranları 0.48 ve kum/çimento oranı 2,75’dir. Harçların 12 saat 90°C buhar kürü sonrası sudaki genleşmeleri karşılaştırılmıştır (Şekil 3.18). Buhar kürü sonrasında GEO kaynaklı genleşmeyi hızlandırmak amacıyla, bir devir kuruma ıslanma (kılcal çatlatma için) uygulaması yapıldığı da belirtilmektedir. Şekil 3.18’den görüleceği üzere, sadece dere kumları karşılaştırıldığında kum boyutu azaldıkça genleşme miktarı artmıştır. Ancak kum kökeni değiştiğinde daha ince kumların daha az genleşme değeri verebileceğini gösteren sonuçlar da elde edilmiştir.

Tablo 3.3 Fu ve diğeri (1997), tarafından kullanılan kumların tane boyut dağılımları.

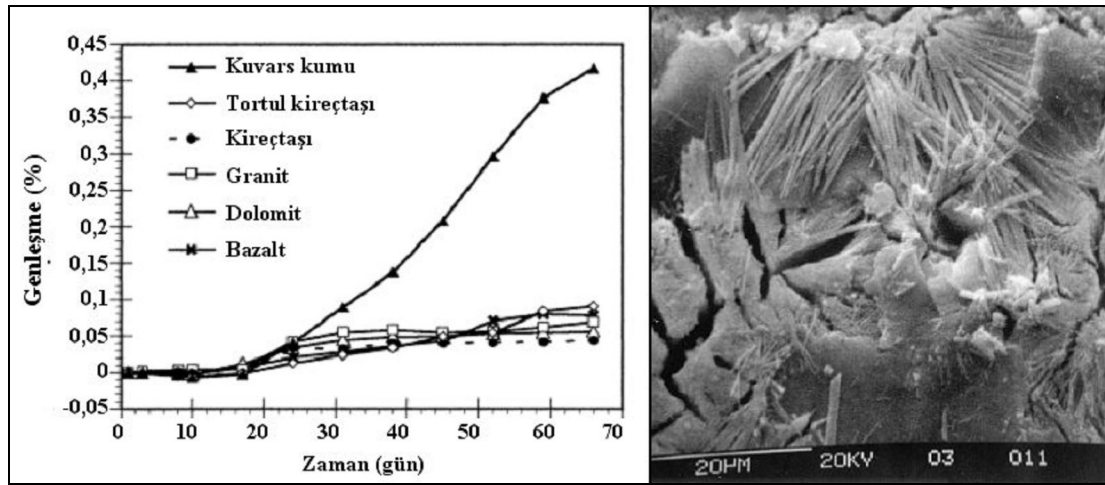
Elek Açıklığı (mm)	Geçen %				
	Dere kumu	İnce dere kumu	Kaba dere kumu	Kesikli gradasyonlu kum	No. 20-30 kumu
4,75 (No.4)	100	-	-	-	-
3,33 (No.6)	93	-	100	-	-
1,18 (No.16)	81	-	62	100	100
0,8 (No.20)	73	100	30	-	85-100
0,6 (No.30)	60	45	-	98	0-5



Şekil 3.18 Farklı tane boyut dağılımlarına sahip kumlarla hazırlanan harçların GEO kaynaklı genleşme değerleri.

Agreganın petrografik kökeni, termal genişleme katsayısı ve yüzey özelliklerini etkilediği için GEO kaynaklı genişlemenin mekanizmasını, oluşum hızını ve şiddetini değiştirmektedir (Lawrence, 1995b). Genleşme mekanizmasında agreganın kimyasal bir etkisi olmadığı düşünülmektedir.

Grattan-Bellew ve diğerleri (1998), tarafından yapılan çalışmada, harç örneklerinin GEO kaynaklı genişleme hızlarının, kullanılan agreganın tipine göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu amaçla hepsi aynı tane boyut dağılımına sahip kuvars, kireçtaşı, granit, dolomit ve bazalt kumu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun GEO potansiyeli bulunmaktadır. Çimento harçlarının S/Ç oranları 0,48, kum/çimento oranları 2,75'dir. Örnekler 12 saat 95⁰C buhar kürü sonrası soğutma ve bir devir kurutma ıslanma etkisine maruz bırakılmıştır. Deneyi daha da hızlandırmak için üç devir ıslanma kuruma daha yapılmıştır. Daha sonra örneklerin sudaki 70 günlük genişleme değerleri ölçülmüştür. Deney sonuçları Şekil 3.19-a' da verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 3.19 Farklı agregalar kullanılarak hazırlanan çimento harçlarının genişleme değerleri { a) hızlandırılmış yöntemler kullanılarak yapılan 60 günlük ölçümler, b) genişleyen kuvars agregalı örneğin agrega yüzeyini kaplamış masif etrenjit oluşumu } (Grattan-Bellew vd., 1998).

Grattan-Bellew ve diğerleri (1998), hızlandırmaya yönelik olarak yapılan ıslanma kurutma işlemleri ile, yalnızca kuvars agregalı örnekte GEO oluşumunun, 60 gün gibi çok kısa bir sürede ortaya çıkmasını sağlamıştır. Yapılan mikroyapı

incelemelerinde, kuvars agregalı örneklerin yüzeylerinin masif etrenjit tabakaları ile kaplandığı rapor edilmiştir (Şekil 3.19-b). Diğer örneklerin daha uzun vadeli genleşme değerleri mevcut değildir.

3.3.1.4 S/Ç Oranı ve Geçirimsizlik

Mehta, S/Ç oranı ile çimento hidratasyonu sonucu oluşan etrenjitin yapısı arasında bir ilişki olduğunu belirtmiştir. Yüksek S/Ç oranlı betonlarda boşluk suyunun pH'ı daha düşük olacağından, meydana gelen etrenjitlerin iri kristaller şeklinde bol miktardaki kapiler boşluklarda oluşacağını vurgulamış ve genleşmenin meydana gelmeyeceğini belirtmiştir. Öte yandan düşük S/Ç oranlı betonlarda boşluk suyu alkalitesi göreceli olarak daha yüksek olacağından, meydana gelen etrenjit kristalleri daha küçük ve daha çok miktardadır. Bu durumda zaten daha az olan kapiler boşluklarda oluşan mikrokristalin etrenjit genleşme yaratabilir (Fu, 1996).

GEO mekanizması için de benzer durum geçerlidir. Çok geçirimli (S/Ç=0,7) ve hiç geçirimsiz betonlarda GEO hasarı genellikle gözlenmemektedir. Zira çok geçirimli betonda etrenjitin yeniden kristalizasyonunun, hasar vermeden bağlantı yapabileceği çok miktarda kapiler boşluk bulunmaktadır. İç sülfat kaynakları da dış sülfat etkisinde olduğu gibi, sürekli yenilenmediğinden bu boşlukların dolması ve genleşme yaratması pek mümkün değildir.

Oysa bu tür zayıf betonlar dış sülfat etkisinden daha hızlı ve fazla hasar görmektedirler. Öte yandan, özel yöntemlerle üretilen ultra yüksek dayanımlı ve çok geçirimsiz betonlar ve su yalıtımı yapılmış betonlar (aslında formüllerinde çok miktarda GEO riskli çimento bulundurmalarına rağmen) GEO açısından problem yaratmamaktadır (Heinz ve Ludwig, 2004). En riskli grup geçirimsizliği az olmasına rağmen, yüksek dayanımlı olan ve dış ortam koşullarına açık olan prefabrik betonlardır. Çünkü bu tür prefabrik betonlar, hem inceliği yüksek, hem de C₃A, SO₃ ve alkalice zengin çimento ile üretilmektedirler. Hidratasyon ısısının ve beton sertleştikten sonraki termal etkilerin yarattığı kılcal çatlak oluşumu GEO riskini arttırmaktadır.

3.3.1.5 Mineral Katkı Kullanımı

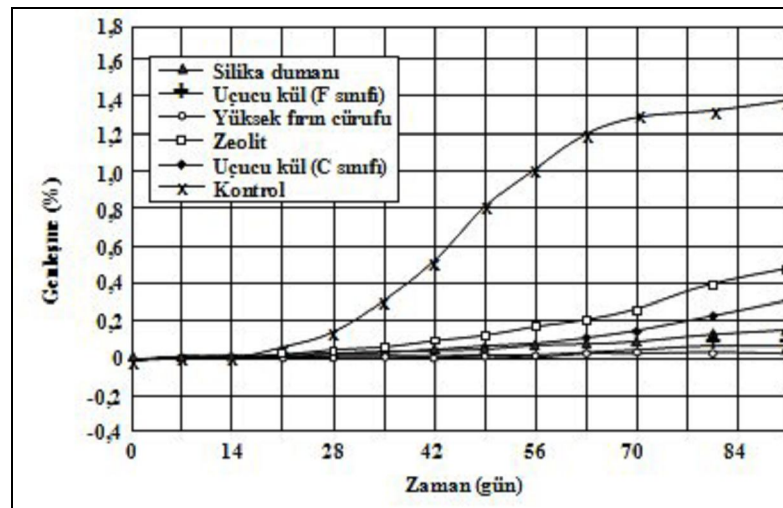
Bilindiği üzere klasik sülfat etkisine karşı, mineral katkıların kullanımı son derece etkili bir önlemdir. Çünkü etrenjitin oluşum kaynağı olan çimento miktarını azaltırlar. Ayrıca, çimentonun zayıf hidratasyon ürünlerinden CH'ı bağlayarak ilave dayanım ve geçirimsizlik sağlarlar. Özellikle uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, doğal puzolanların kullanımı beton dayanıklılığı açısından gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Mineral katkıları arasında silis dumanı klasik sülfat etkisine karşı en etkililerden birisi olarak kabul edilir (Ping ve Beaudoin, 1992).

Mineral katkıların GEO riskine karşı da etkili oldukları pek çok araştırma ile tespit edilmiştir (Odlar ve Chen, 1996, Miller ve Conway, 2003, Stark ve diğer., 1998, Shayan ve diğer., 1993, Ramlochan ve diğer., 2003). Etkinlikleri özellikle klasik sülfat etkisinde olduğu gibi, çimento miktarını azaltmaları (dolaylı olarak hidratasyon ısı kaynağı termal çatlakları azaltma) ve uzun vadeli geçirimsizliği azaltmaları ile ortaya çıkmaktadır (Stark ve diğer., 1998). Gerçekten de iyi tasarlanmış ve erken yaşta iyi kür edilmiş mineral katkılı betonlar çok geçirimsiz olabilmektedir. Bu açıdan GEO riskini azaltmada çok etkilidirler. Ancak, çoğu prefabrik eleman üreticisi mineral katkıları erken dayanımlarının düşüklüğü nedeniyle kullanmamaktadır.

Yapılan araştırmalar farklı kökenli mineral katkıların performanslarının değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Fu (1996), farklı mineral katkıları çimento ile farklı oranlarda ikame ederek çimento harçları hazırlamıştır. Bu harçların S/Ç oranı 0,48, kum/çimento oranı 2,75'dir. Tüm karışımlarda GEO riski olan bir çimento kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu, F ve C sınıfı uçucu kül ve öğütülmüş doğal zeolit çimento miktarının ağırlıkça %30'u ile ikame edilmiştir. Buhar kürü sonrası (90°C) örnekler deneyi hızlandırmak için ıslanma kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Daha sonra suda bekleme aşamasında 90 günlük genleşme değerleri ölçülmüştür (Şekil 3.20). Fu (1996)'ya göre öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve F tipi uçucu kül, GEO kaynaklı genleşmeleri engellemekte C sınıfı uçucu kül, zeolit ve silis dumanına kıyasla daha etkilidir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve F tipi uçucu

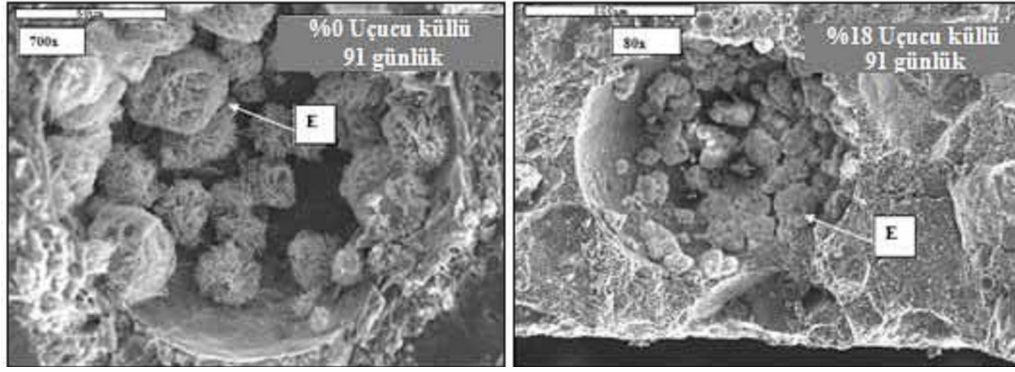
kül kullanıldığında hemen hemen hiç genleşme olmamıştır. En çok genleşen örnek, bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılan karışımdan çıkmıştır. Uçucu küller arasındaki farklılık başka araştırmacılar tarafından da vurgulanmıştır. Zacarias'a (2002) göre F ve C sınıfı uçucu küller arasındaki alümina içeriği farkı GEO kaynaklı genleşmeyi etkilemiş, yüksek alümina içerikli F sınıfı kül daha iyi performans vermiştir.

Normal sıcaklıklarda C sınıfı uçucu kül ilavesi erken yaşlarda oluşan etrenjit miktarını arttırmaktadır. Böylece etrenjit kristallerinin etrafını kapladığı C_3A 'nın reaksiyonu gecikmekte dolayısıyla priz süresi gecikmektedir.



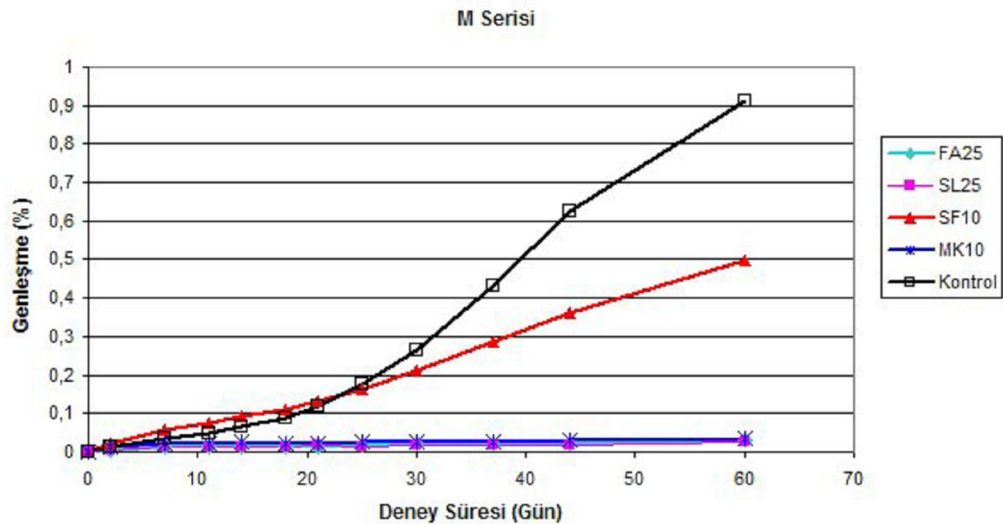
Şekil 3.20 Farklı kökenden mineral katkıların GEO kaynaklı genleşmeye etkileri (Fu, 1996).

Acquaye (2006), doktora tezinde F sınıfı uçucu kül ve cüruf kullanımının GEO kaynaklı genleşmeyi azaltmada etkili olduğunu belirlemiştir. Mikroyapı incelemelerinde suda bekleme aşamasında oluşan etrenjit miktarları arasında önemli bir fark olmadığını, boşluklarda benzer yoğunlukta etrenjit birikimleri olduğunu belirtmiştir (Acquaye, 2006). Genleşme farkı belki de buhar küründen sonra oluşan mikrokristalin etrenjitin, uçucu küllü örneklerde düşük boşluk suyu alkalitesi nedeniyle, iri kristaller şeklinde büyük boşluklarda oluşmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3.21). Böylece etrenjitin genleşme yaratıcı etkisi ortadan kalkmış olabilir.



Şekil 3.21 Sade çimentolu ve %18 uçucu küllü örneklerin, buhar kürü sonrası 91 günlük taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (E: etrenjit).

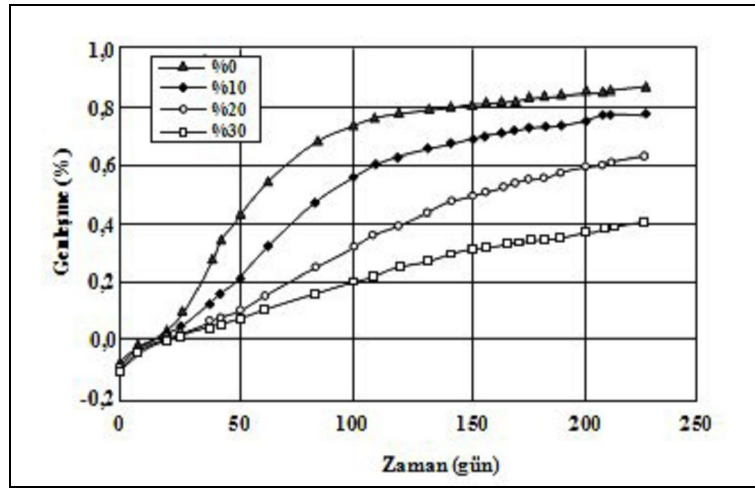
Tosun (2008) doktora tezinde gecikmiş etrenjit oluşumunu incelemiş ve deneysel çalışmalarında uçucu kül, cüruf, silis dumanı ve metakaolin kullanmıştır. Kullanılan bu dört mineral katkıdan, en etkili olanı yüksek fırın cürufudur (Şekil 8.60). Uçucu kül ve metakaolin de oldukça iyi performans göstermiştir. Yalnızca silis dumanı kullanılan örnekler, kontrol örneklerine göre daha düşük olmasına rağmen, diğer mineral katkılara göre daha yüksek genleşme değerleri vermiştir. Silis dumanı hem dayanım hem de dayanıklılık açısından betonda katkı maddesi olarak sıklıkla kullanılmakta ve etkili çözümler sağlamaktadır. Ancak GEO'yu önleme konusunda çok etkili olmadığı görülmüştür.



3.22 Mineral katkıların GEO kaynaklı genleşme üzerindeki etkileri (Tosun, 2008).

3.3.1.6 Lif Kullanımı

GEO'yu engellemeye yönelik olarak lif kullanımı pek karşılaşılmayan bir uygulamadır. Bu konuda, sadece bir deneysel çalışma tespit edilebilmiştir. Bilindiği gibi, çimento harcında mikro-çatlak oluşumu GEO riskini artırmaktadır. Mikro-çatlakların miktarı lif kullanılarak azaltılabilir. Fu (1996), wollastonit mikro-lifi kullanımının GEO'ya etkisini incelemek için çimentonun ağırlıkça, %10, %20 ve %30'u oranlarında lif kullanarak çimento harçları hazırlamıştır. Şekil 3.23'de görüldüğü gibi çok etkili olmasa da mikro-lif kullanımı genleşme miktarını azaltmıştır.



Şekil 3.23 Wollastonit lifi kullanımının GEO kaynaklı genleşmeye etkisi.

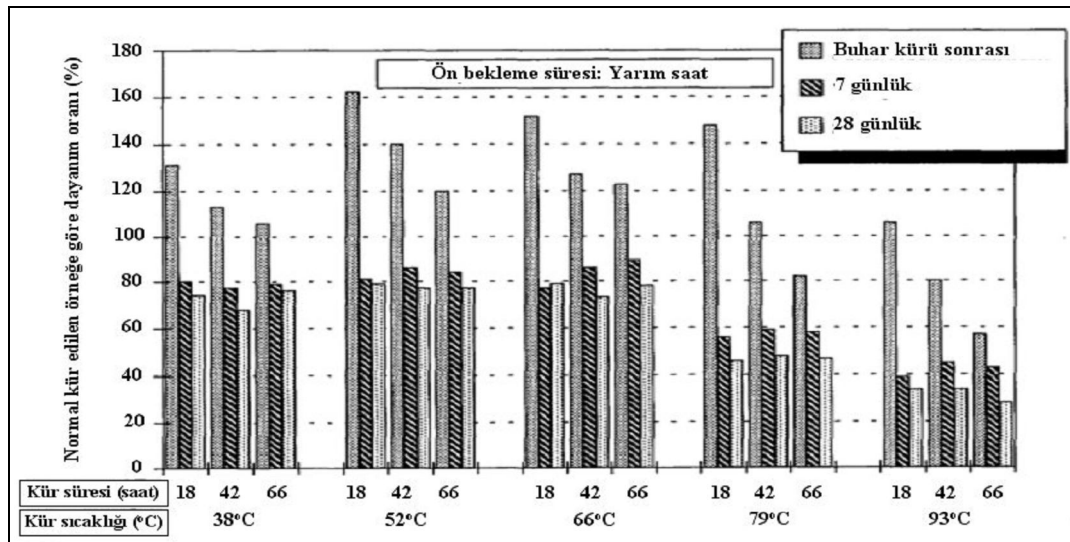
3.3.2 GEO Kaynaklı Genleşmeyi Etkileyen Dış Faktörler

GEO kaynaklı genleşmenin oluşma ihtimalini etkileyen dış faktörler, çimento esaslı malzemeye uygulanan buhar kürü ve sonrasındaki servis koşullarıdır.

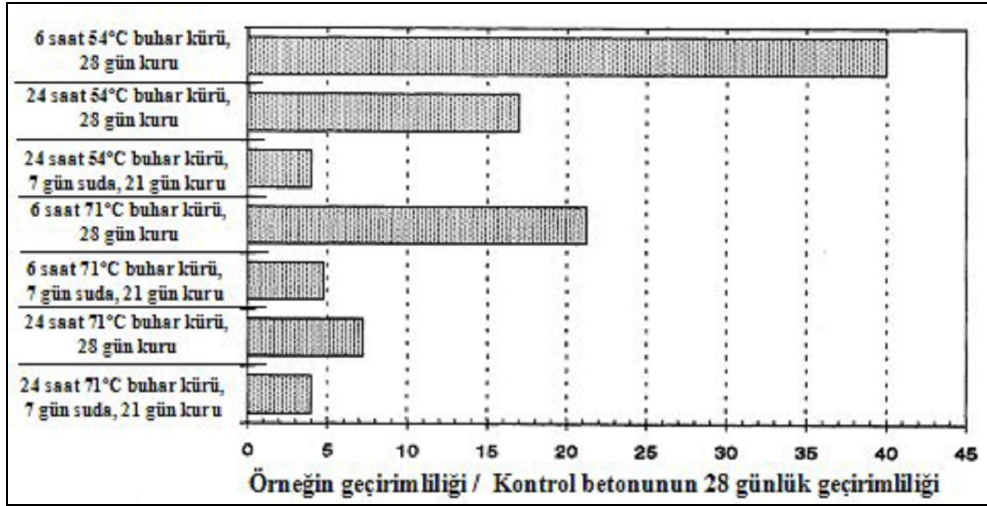
3.3.2.1 Buhar Kürü Koşulları

Buhar kürü özellikle çimento esaslı malzemelerin hızlı dayanım kazanması amacıyla uygulanmaktadır. Getirisinin yanında uzun vadeli dayanımda kayıp (Day, 1992) ve içyapıda porozite artışı gibi (Goto ve Roy, 1981, Kjellsen ve diğer., 1990, Kjellsen ve

diğer., 1991) bazı olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Şekil 3.24’de farklı sıcaklıklarda ve sürelerde buhar kürü uygulamasının erken ve nihai dayanımı, normal kür edilen bir örneğe göre nasıl etkilediği görülmektedir. Şekil 3.24’den görüleceği üzere, buhar kürü uygulaması koşullara göre, 28 günlük dayanımı normal kür görmüş örneğin %30’una kadar indirebilmektedir. Buhar kürü anında oluşan hidratasyon ürünlerinin düzensiz ve boşluklu yapısı dayanımın potansiyel değerin altında kalmasına yol açmaktadır (Divet ve Randriambololona, 1998, Yang ve Sharp, 2001a). Benzer şekilde betonun geçirimsizliği de farklı buhar kürü koşullarında olumsuz etkilenmektedir. Şekil 3.24’de verilen deney sonuçları incelendiğinde, buhar kürünün 28 günlük örneklerin geçirimsizliğini, standart kür edilmiş örneklere göre %40 oranında arttırdığı görülmektedir. Tüm bu deneysel çalışmalar buhar kürünün bilinçsiz yapılması halinde beton dayanıklılığını ve dolayısıyla servis ömrünü olumsuz etkileyeceğini göstermektedir.



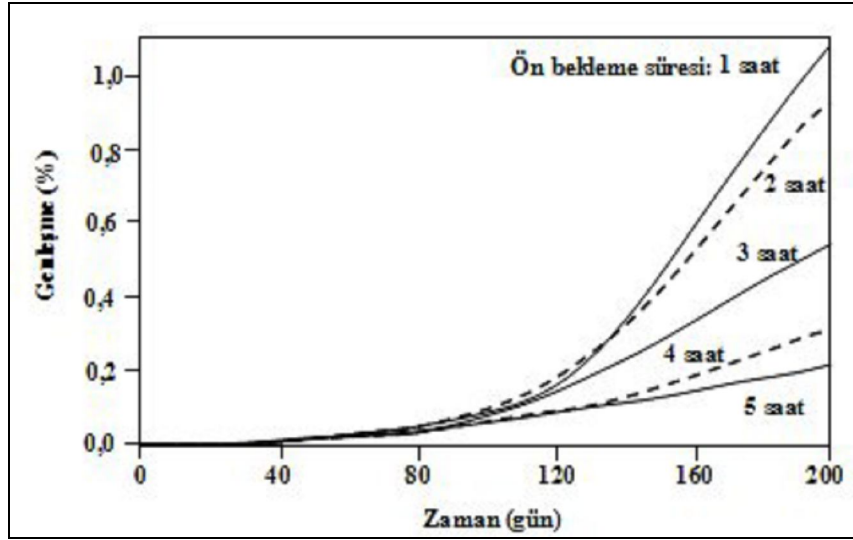
Şekil 3.24 Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde buhar kürü uygulamasının erken ve nihai dayanıma etkisi.



Şekil 3.25 Farklı buhar kürü koşullarının beton geçirimsizliğine etkisi (Day, 1992).

Lawrence (1995a), buhar kürü öncesi bekleme süresinin GEO kaynaklı genleşme riskini iki yönlü etkilediğini savunmaktadır. Ön bekleme süresi çok kısa tutulursa CSH yapısı daha oluşmadan sıcaklık yükseleceğinden, CSH yapısına adsorbe olan sülfat miktarı azalacaktır. Bu durumda genleşme riski azalmaktadır. Öte yandan ön bekleme süresi çok uzun tutulursa, bu sürede iri monosülfat kristalleri oluşmakta, CSH yapısı masifleşerek sülfat adsorblama yeteneğini kaybetmektedir. Ancak, CSH'ın en fazla sülfatı adsorblayabileceği, dolayısıyla GEO riskini en fazla arttırabileceği bir pesimum ön bekleme süresi (yaklaşık 4 saat) olduğu iddia edilmektedir.

Fu ve diğerleri (1997) ise yaptıkları deneysel çalışmada, ön bekleme süresi arttıkça GEO kaynaklı genleşme miktarının azaldığını gözlemlemiştir. Deneysel çalışma kapsamında, GEO riski olan bir çimento (C_3A : %10,3, SO_3 : %4,1, Blaine özgül yüzeyi $568 \text{ m}^2/\text{kg}$.) ile harç çubukları hazırlanmıştır. Bu örnekler 1 saat ile 5 saat arası ön bekleme sonrasında, 90°C 'de 12 saat buhar kürüne maruz bırakılmıştır. Ardından su içinde bekleme döneminde boy ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.25'de görülmektedir. Fu ve diğerlerinin (1997) çalışmaları ön bekleme süresi için 4 saat gibi bir pesimum olduğu görüşünü çürütmektedir. Diğer taraftan, ön bekleme süresinin artışının genleşmeyi azaltma mekanizması açısından bir önceki paragrafla benzer görüşler rapor edilmiştir.



Şekil 3.26 Ön bekleme süresinin GEO kaynaklı genişlemeye etkisi (Fu vd., 1997).

Buhar kürü tepe sıcaklığı GEO kaynaklı genişleme riskinde, dış etkiler arasında belki de en önemli parametredir (Kelham, 2004). Çünkü tepe sıcaklığı, buhar kürü öncesi oluşan etrenjitin stabilitesini etkileyen kritik parametrelerden biridir. Tepe sıcaklığının yüksek olması, hem etrenjit stabilitesini azaltarak boşluk suyuna sülfat salınımını arttırmakta, hem de boşluk suyuna salınan sülfatın CSH yapısına bağlanmasını veya monosülfat oluşturmasını eş zamanlı olarak tetiklemektedir (Divet ve Randriambololona, 1998). Bu açıdan buhar kürü tepe sıcaklığı GEO riskini azaltmak için, pek çok araştırmacı tarafından sınırlandırılmıştır. Lawrence (1995a) genişleme riski için kritik buhar kürü sıcaklığını 65-70°C derece olarak önermiştir. Day (1992) ve Lawrence (1995b) literatür taramalarında, farklı araştırmacıların 70-75°C üstü ve 80°C gibi rakamlar verdiğini de belirtmiştir. Aslında tepe sıcaklığı kritik değeri çimento tipi ve diğer bileşen özellikleri ile de yakından ilgilidir. Örneğin, 100°C buhar kürü görse bile GEO riski taşımayan çimento kompozisyonları mevcuttur (Kelham, 1996). Bu açıdan GEO riski taşıyan çimentolarla yapılan çalışmalar için tepe sıcaklığı sınırları belirtilmelidir.

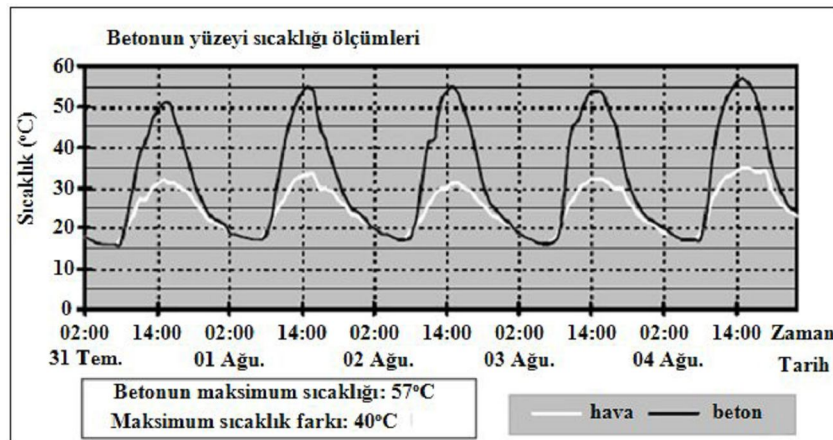
Yang ve diğerlerine (1999a) göre, buhar kürü tepe sıcaklığının artırılması ile GEO kaynaklı genişlemenin ortaya çıkması için gerekli bekleme süresi de kısalmaktadır. Örneğin, 70°C buhar kürü sonrası 400 günde ortaya çıkan genişleme,

100°C'de buhar kürü sonrası sadece 90 günde ortaya çıkmaktadır. Çimento tipi de önemli olduğundan, 100°C'de buhar kürü sonrası genleşme riski yaratan bir çimento ile hazırlanan harç, 70°C buhar küründen sonra yıllarca hiç genleşmeyebilir.

Isıtma hızının GEO kaynaklı genleşme üzerine etkisi sistematik olarak araştırılmasa da hızlı ısıtmanın genleşmeyi arttıracak izlenimi veren çalışmalar mevcuttur. Fu (1996), buhar kürü ısıtma hızının yüksek tutulmasının etrenjit dekompozisyonu açısından etkili olacağını savunmaktadır. Buhar kürü soğutma hızı üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, hızlı soğutmanın genleşmeyi azalttığı yönündedir (Lawrence, 1995b).

Buhar kürü olmaksızın servis ömrü boyunca yüksek sıcaklık etkisi geçiren yapılarda da GEO riski ortaya çıkabilir (Stark ve Bollmann, 2000a). Örneğin yaz aylarında dökülen betonlarda bir de sıcak çimento kullanılırsa beton sıcaklığı 70°C'yi rahatlıkla aşabilmektedir. Özellikle kütle betonlarında bu durum gözlenebilir (Zhang ve diğer., 2002a).

Beton sertleştikten sonra da buhar kürü benzeri yüksek sıcaklık etkisine maruz kalabilir. Örneğin, Şekil 3.27'de görüldüğü gibi güneş altında açıkta bırakılan beton panellerde güneş ışınlarının şiddetine göre, hava sıcaklığı 35°C iken 50-60°C arası sıcaklıklar ölçülebilmektedir (Zhang ve diğer., 2002b, Yan ve diğer., 2004).



Şekil 2.27 Güneş altında açıkta bırakılan beton panellerde beton ve hava sıcaklığı (Stark ve Bollmann, 2000a).

3.3.2.2 Buhar Kürü Sonrasında Bekleme Koşulları (Ortam Alkalinitesi)

Buhar kürü sonrasında çimento esaslı yapı elemanının maruz kalacağı ortam koşulları GEO'yu etkileyen ikinci önemli dış faktördür. Kuru havada beklemesi halinde GEO riski ortaya çıkmamaktadır. Ancak çoğu yapı elemanı servis ömrü boyunca su ve nem ile etkileşim içinde olabilir. Buhar kürü görmüş örneklerin suya veya neme maruz kalması, GEO kaynaklı genleşmenin meydana gelebilmesi için gerekli bir koşuldur. Yalnızca reaksiyonların devamını sağlama ile değil, boşluk suyundan alkali çıkışını hızlandırma ile de su, genleşme riskini artırır. Zira alkalinitesi düşük ortamlarda etrenjitin çözünürlüğü azalmakta ve etrenjitin yeniden oluşma riski artmaktadır (Shimada ve diğer., 2005). Havada, nemli ortamda bekletme ise, çimento harcındaki alkalilerin sistem dışına çıkmasını sağlayamadığı için çok etkili değildir (Azzam, 2002, Diamond, 2000). Ancak nem, içyapıda suda çözünebilir alkalilerin konsantrasyonlarını değiştirecek derecede hareketliyse, etkisi geç yaşlarda da olsa görülebilir. Hatta etkisi daha heterojen olacağından, su içinde bekleme durumunda hareketli nemin yapıda daha fazla hasara yol açması mümkündür (Stark ve Bollmann, 1999, Graf, 2007).

Yüksek pH değerlerinde (pH=13) oluşan mikrokristalin etrenjit hem çok küçük hem de çok kararsızdır. Bu mikrokristalin etrenjit, nem varlığında boşluk suyunda çözünerek farklı kılcal boşluklarda yeniden kristalize olmaya meyillidir. Nemin kapiler boşluklarda sürekli hareketlendirdiği bu yapı; zayıf çatlak, boşluk ve arayüzeylere ulaştığında yeniden kristalize olmaktadır (Stark ve Bollmann, 1999).

Hatırlanacağı üzere, birincil etrenjit, pH 13,0 seviyelerinde hidratasyonun ilk saatlerinde oluşmaktadır. Bir gün sonra pH 13,6'ya, 28 günde ise 13,8'in üstüne çıkmaktadır. Bu seviyelerde etrenjitin stabilitesini koruması bir önceki paragrafta yapılan deneysel çalışmaların sonucuna göre mümkün görünmemektedir. Bu durumda sadece alkalinite yüksekliğinden etrenjitin dekompoze olması gerekmektedir. Üstelik bunun için yüksek sıcaklığa da gerek yoktur. Etrenjitin akibeti ile ilgili iki ihtimal öne sürülebilir: Etrenjit ayrışıp boşluk suyunun uygun

olduğu bir boşlukta ya da çatlakta yeniden kristalize olmuştur. Ya da oluşan etrenjit pH 13,8'de de stabildir ancak, kristal boyutu çok küçük olduğundan XRD açısından amorf yapıdadır ve tespit edilememektedir.

Buhar kürünün yarattığı hızlı hidrasyon, boşluk suyu alkalinitesini normal durumdan çok daha hızlı artırarak pH değerini yükseltmektedir. Aslında etrenjitin stabilitesini azaltan neden olarak sıcaklık artışının yanında yüksek alkalinite de gösterilmelidir. Daha sonra suda bekleme aşamasında alkalilerin boşluk suyundan kaçış hızını geçirimsizlik ve çatlak yapısı gibi etkenler belirler, bu yüzden yeniden kristalize olan etrenjit önceden hasar görmüş hemen hemen her yapıda gözlenir (Stark ve Bollman, 2000b).

3.3.2.3 Buhar Kürü Sonrasında Bekleme Sırasında Fiziksel Hasar Yaratıcı Etkiler (Islanma Kuruma)

Buhar kürü sonrasında içyapıda herhangi bir nedenden dolayı (ıslanma kuruma, ısınma soğuma, donma çözülme, tekrarlı yükleme boşaltma, gerilme yığılması, aşırı yükleme...) kılcal çatlak oluşması GEO kaynaklı genişlemenin ortaya çıkma süresini kısaltmaktadır. Özellikle ıslanma kuruma ve ısınma soğuma gibi termal ve hidrolik etkiler pek çok yapıda servis ömrü boyunca kılcal çatlak oluşumuna yol açmaktadır. Kılcal çatlak oluşumunun GEO kaynaklı genişlemenin ortaya çıkma süresini kısaltma nedenleri;

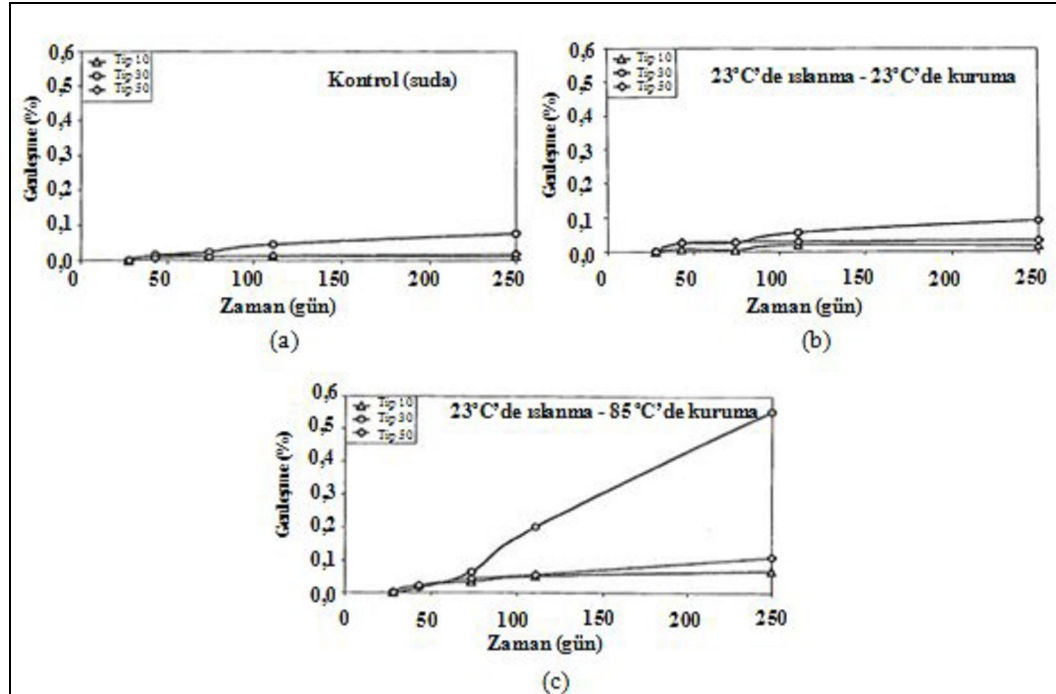
- Kılcal çatlaklardan su girişi ile reaksiyonların hızlanması,
- Alkali hidroksit iyonlarının boşluk suyundan ayrılarak etrenjitin yeniden oluşumuna zemin hazırlaması,
- Küçük ve dar kılcal boşlukların mikrokristalin etrenjitin oluşumu için uygun ortam yaratması ve genişleme şiddetinde bu tür etrenjitlerin oluşumunun önemli rol oynaması olarak sıralanabilir.

Islanma-kuruma döngüsünün GEO kaynaklı genişlemeye etkisi Fu (1996)'nın hazırladığı bir deneysel çalışmada incelenmiştir (Şekil 3.28). Tablo 3.4'de üç farklı çimento kullanılarak özellikleri verilen harç örnekleri hazırlanmıştır. Örnekler 90°C

buhar kuru sonrasında farklı etkilere maruz bırakılmıştır. İlk etki buhar kuru sonrasında 23°C’de %50 bağıl nemde 14 gün kuruma ve sonra ıslanma şeklindedir. İkinci etki ise 85°C’de 24 saat kurumadan sonra ıslanmadır. Etkilerden sonra suda bekletilen örneklerin genleşmeleri ölçülmüştür. Hiçbir etki görmeyen örneklerle, 23°C’de %50 bağıl nemde 14 gün kuruma ve sonra ıslanma etkisi gören örneklerde tüm çimento tipleri için genleşme olmamıştır (Şekil 3.28-a, 3.28-b). Buhar kuru sonrasında 85°C’de 24 saat kurutulan örneklerde ise Tip 30 çimentosu (GEO açısından en riskli çimento) ile hazırlanan harçta genleşme gözlenmiştir (Şekil 3.28-c).

Tablo 3.4 Fu (1996)’nın kullandığı çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Çimento tipi	C ₃ A (%)	SO ₃ (%)	Blaine özgül yüzey alanı (m ² /kg)	Na ₂ O+K ₂ O (%)
Tip 10	6,20	2,45	256	0,53
Tip 30	10,26	4,08	568	0,60
Tip 50	2,77	2,40	420	0,81



Şekil 3.28 Buhar kuru sonrası ıslanma kuruma uygulamanın genleşmeye etkisi (Fu, 1996).

3.4 Gecikmiş Etrenjit Oluşumunun Tespitine Yönelik Deney Yöntemleri

GEO kaynaklı hasarlar sahada genellikle başka hasar yaratıcı etkilerle (ASR, donma çözülme, ıslanma kuruma...) birlikte görülmektedir. Yapıda genellikle mikro çatlak yaratan bu etkilerin GEO'yu tetikleyici olduğu açıktır. GEO riskini önceden tahmin etmeye yönelik teorik formüller ve deney yöntemleri saha örneklerindeki tecrübelerden de yararlanılarak geliştirilmiştir. Genel olarak, buhar kürü görmüş örneklerde başlangıçta çatlak yaratma prensibine dayanmaktadırlar (Diamond, 1996).

GEO kaynaklı genleşme üzerine çalışan araştırmacılar, çok sayıda deney verisini kullanarak, genleşme ile çimento kaynaklı faktörler arasında ampirik bağıntılar kurmuşlardır. Bu yolla teorik genleşme miktarını tespit eden formüller geliştirilmiştir. Örneğin, sözü edilen formüllerden çimento kompozisyonunu dikkate alan "GEO indeksi" Zhang ve diğerleri (2002b), tarafından şu şekilde geliştirilmiştir: Yapılan deneylerde GEO kaynaklı genleşmeyi etkileyen çimento özelliklerinin C_3A ve SO_3 miktarları, alkali içeriği ve SO_3/Al_2O_3 molar oranı olduğu görülmüştür. Ancak her biri ayrı ayrı genleşme ile ilişkilendirildiğinde anlamlı sonuçlar elde edilememiştir. Hatırlanacağı üzere, bir önceki bölümde de C_3A , SO_3 miktarları ve alkali içeriği tartışılmıştı (Kelham, 1996). SO_3/Al_2O_3 molar oranı ile genleşme arasında da belirgin bir ilişki olmadığı Şekil 3.28'de görülmektedir. Bu sonuçlar üzerine Zhang ve diğerleri (2002b), tüm parametreleri bünyesinde toplayan "GEO indeksi" formülünü geliştirmiştir (Formül 3.1). Böylece genleşme ile ilişkili bir tanım ortaya konulmuştur. Şekil 3.29-a ve 3.29-b'de farklı özelliklere sahip çimentolarla hazırlanıp $85^\circ C$ 'de buhar kürü uygulanmış örneklerin sırasıyla 800 ve 1400 günlük genleşme değerleri ile "GEO indeksleri" arasındaki ilişkiler görülmektedir. Genel olarak, GEO indeksi'nin 1,2'den fazla olması durumunda çimento riskli sınıfına girmektedir. Bazı istisna noktalar 800 günlük genleşme için gözlenirse de bu örnekteki genleşme potansiyelinin 1400 günde bir miktar ortaya çıktığı belirlenmiştir (Şekil 3.29-b). Bu tür istisna noktaların olması bir bakıma doğaldır. Çünkü "GEO indeksi" kimyasal kompozisyondaki tüm bileşenlerin tam verimle kullanıldığı kabulü ile genleşme tahmini yapmaktadır. Oysa çimento inceliği de fazların reaktivitelerinde çok önemli bir etkidir.

$$GEO\ indeks = (SO_3/Al_2O_3)_m \times [(SO_3 + C_3A)_w/10] \times \sqrt{Na_2O_{eşd}} \quad (3.1)$$

$(SO_3/Al_2O_3)_m$: SO_3 'ün Al_2O_3 ' molar oranı

$(SO_3 + C_3A)_w$: SO_3+C_3A 'nın ağırlıkça miktarı

$Na_2O_{eşd}$: Eşdeğer alkali oranı

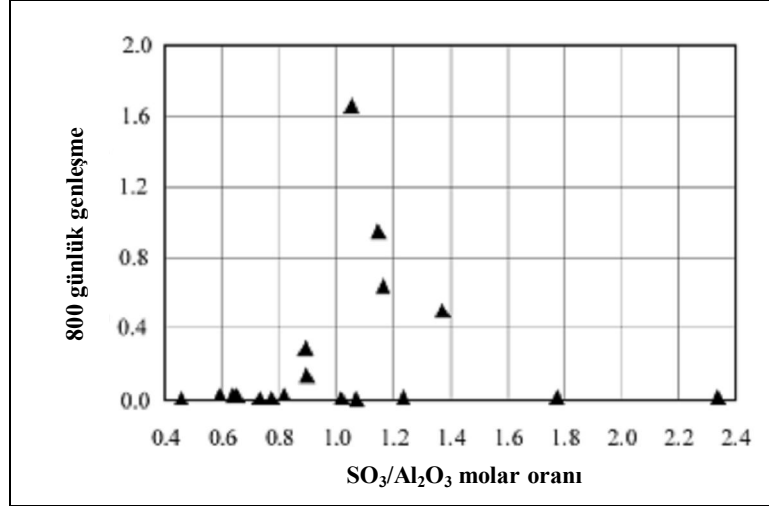
Kelham (1996), çimento kompozisyonunun yanında çimento inceliğini de genişleme tahmininde hesaba katan ampirik bir formül geliştirmiştir. Formülü geliştirirken çok sayıda çimento kullanarak harçlar hazırlamıştır. Bu çubukların $90^\circ C$ buhar kürü sonrası sudaki nihai genişmelerini kullanmıştır. Formül 3.2'de incelik artışının genişmeyi arttırdığı görülmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Nihai genişme (90}^\circ C \text{ buhar kürü sonrası)} = & 0,00474 * \text{ÖYA} + 0,0768 * \text{MgO} + \\ & 0,217 * C_3A + 0,0942 * C_3S + 1,267 * Na_2O_{eşd} - 0,737 * \text{ABS} [SO_3 - 3,7 - 1,02 * \\ & Na_2O_{eşd}] - 10,1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

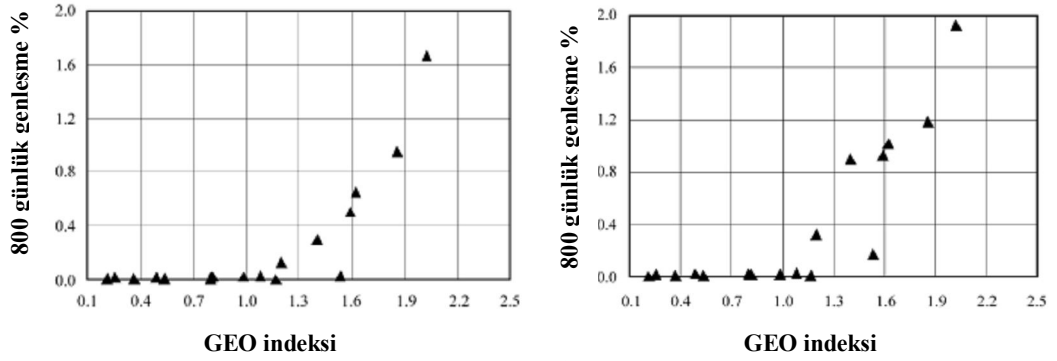
ÖYA: Özgül yüzey alanı

ABS: Mutlak değer

Yukarıda örneklendirilen tüm formüller, genellikle çimento açısından GEO hassasiyetini dikkate almakta ve buhar kürü koşulları açısından deneyi yapanın belirttiği sabit şartlar için geçerli olmaktadır. Bu açıdan bakıldığında yalnızca çimentonun, GEO kaynaklı genişleme riskini tahmin etmede kullanılabilecekleri söylenebilir. Buhar küründeki değişiklikler ve agrega özellikleri, formüllerde dikkate alınmamıştır. Aslında yapılabilecek en uygun işlem, yerel malzemeleri kullanarak örnekler hazırlayıp, hızlandırılmış deney yöntemlerinde performanslarının incelenmesidir.



3.29 Buhar kürü (85^oC) sonrası suda bekleyen örneklerin genleşmeleri ile SO₃/Al₂O₃ molar oranları arasındaki ilişki (Zhang ve diğer., 2002b).



Şekil 3.30 GEO indeksi ile; a) 800 günlük ve b) 1400 günlük genleşmeler arasındaki ilişkiler (Zhang ve diğer., 2002b).

3.4.1 GEO Potansiyelini Tespitte Kullanılan Hızlandırılmış Deney Yöntemleri

İncelenen deneysel çalışmaların büyük çoğunluğunda genleşme riskinin tahmini için 800-1400 günlük değerler kullanılmıştır. Normal koşullar altında GEO' nun ortaya çıkması yıllar almaktadır. Sahada da genleşme oluşması için diğer başka hasar mekanizmalarının devreye girmesi, en azından kılcal çatlak oluşturması GEO' nun başlaması için gerek koşuldur. Üstelik laboratuarda hazırlanan örneklerin küçük olması ve sürekli suda beklemesi gibi hızlandırıcı etkiler olmasına rağmen genleşme

oluşumu çok zaman almaktadır. Uzun zamanda meydana gelen genleşmelerin kısa süreli hızlandırılmış deney koşulları kullanılarak sağlıklı tahmin edilmesi üzerine pek çok araştırma yapılmıştır (Azzam, 2002, Grabowski, 1998, Idorn ve Skalny, 1993, Pavoine ve Divet, 2003, Pavoine ve diğer., 2006a, Pavoine ve diğer., 2006b). Bu bölümde sözü edilen yöntemlerin genel felsefeleri özetlenecektir. Ardından en etkilileri olarak kabul edilen Duggan (Grabowski, 1998, Idorn ve Skalny, 1993), Attiogbe ve Fu (Fu, 1996, Tagnit-Hamou ve Petrov, 2004) yöntemleri açıklanacaktır.

Betonda erken yaşlarda oluşan zayıf noktalar (kılcal mikroçatlaklar, boşluklar, termal etkilerden çatlamaş ara yüzey, büzülme çatlakları...) eğer boyutları çok küçükse bir dereceye kadar sertleşmiş beton özelliklerine önemli bir zarar vermez (dayanım, elastisite modülü). Ancak boşluk suyu hareketliliğini kolaylaştırarak, dolaylı olarak etrenjitin yeniden kristalizasyonuna zemin hazırlarlar (Stark ve Bollmann, 1999, Odler, 1997, Yang ve diğer., 1997). Bazı durumlarda örneğin S/Ç oranı çok düşük olan betonlarda otojen büzülme kaynaklı çok sayıda kılcal çatlak içyapıda kendiliğinden meydana gelebilir. Bu durumda nemin sisteme girişi ve hareketliliği yani malzemenin geçirimsizliği olumsuz etkileneceğinden GEO riski artabilir. Tersine S/Ç oranı yüksek betonlarda içyapıda çok miktarda bağlantılı sıkışık hava olması, etrenjitin yeniden kristalizasyonu için uygun ortam yaratır ve genleşme oluşmaz (Stark ve Bollmann, 1999). Özetle GEO riski daha çok, ilk aşamada göreceli olarak geçirimsiz betonlarda ortaya çıkmaktadır. Geçirimsiz betonlarda GEO'nun ortaya çıkması normal şartlarda çok uzun süre almaktadır. Ancak hızlandırıcı etkilerle daha kısa sürede genleşme yaratılabilir. GEO kaynaklı genleşmelerin ortaya çıkışını hızlandıracak etkileri şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Örneğin yüzey alanı/hacim oranının büyütülmesi veya örneğin boyutunun küçültülmesi alkali kaçışını kolaylaştırır (Diamond, 2000, Barbarulo ve diğer., 2005, Shayan ve Quick, 1991, Tagnit-Hamou ve Petrov, 2004).

2. Buhar küre sonrasında örnekte ön çatlak yaratıcı etkiler oluşturmak (Fu ve Beaudoin, 1996c, Fu, 1996, Stark ve Bollmann, 1999, Odler, 1997, Yang ve diğer., 1997, Pavoine ve diğer., 2006a, Pavoine ve diğer., 2006b).

Özellikle ıslanma ve ısınarak kuruma etkisi kılcal çatlak oluşturmaktadır. Genleşme miktarı artar ve ortaya çıkma süresi kısalmır. Lawrence (1995a), çimento hamuru üzerinde yapılan çalışmalarda, buhar kürü sonrası herhangi bir etki yaratmadan bekletilen örneklerin ancak üç senede genleşmeye başladığını tespit etmiştir. Oysa çimento hamurunda mekanik yükleme ile az miktarda çatlak oluşturduğu durumda aynı karışım buhar küründen sonra suda beklerken sadece üç ay sonra genleşmeye başlamıştır.

3. Örneğin beklediği koşulları mümkün olduğu kadar içyapıdan alkali çıkışını kolaylaştıracak şekilde düzenlemek (saf suda tutmak) (Diamond, 2000).

4. Küçük örneklerde karbonatlaşma derecesi de daha fazla olacaktır. CO₂ varlığı etrenjit stabilitesini etkilemektedir. Ancak su içinde bekleme durumunda bu etki zayıftır (Diamond, 2000).

GEO kaynaklı genleşme potansiyelini belirlemede kullanılacak hızlandırma yöntemi çok dikkatli seçilmelidir. Aksi takdirde, deney sonuçları yanlış yorumlara yol açabilir. Örneğin, buhar kürü sıcaklığını 100°C civarına çıkarmak ve süreyi uzun tutmak önceki bölümden hatırlanacağı üzere genleşmeleri tamamen ortadan kaldıracaktır. Ya da çatlak oluşturucu etki şiddeti çok arttırılırsa, bu sefer oluşan çatlak ağı etrenjitin iri kristaller halinde genleşme yaratmadan oluşmasına yol açabilir (Petrov ve Tagnit-Hamou, 2004). Deney koşulları oluşturulmadan önce GEO mekanizması çok iyi yorumlanmalı ve deney sonuçlarının uzun vadeli ölçümlerle uyumlu olup olmadığı araştırılmalıdır.

Duggan (Grabowski, 1998, Idorn ve Skalny, 1993), Attiogbe ve Fu (Fu ve Beaudoin, 1996c, Fu, 1996) yöntemleri GEO kaynaklı genleşme potansiyelini belirlemede kullanılabilecek yöntemler olup, deney yöntemleri ile ilgili ayrıntılar aşağıda açıklanmıştır.

3.4.1.1 Duggan Yöntemi

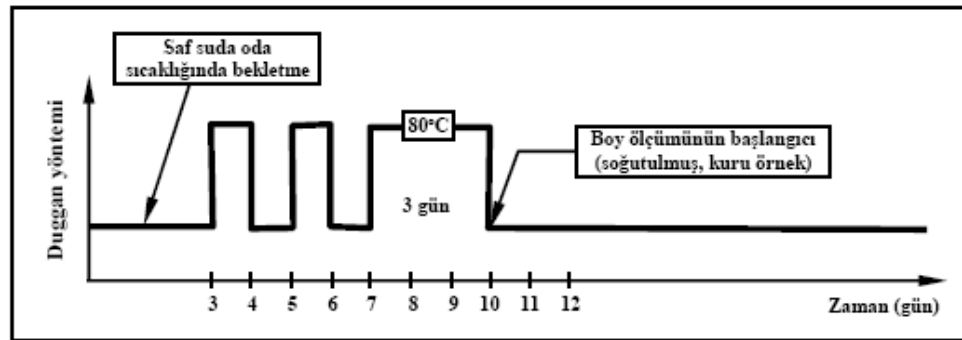
Duggan yöntemi ilk olarak ASR ve iç sülfat kaynaklı genleşme riskinin kısa sürede tespiti amacıyla beton örnekler kullanılarak geliştirilmiştir. Daha sonra bazı

araştırmacılar bu deney yöntemini çimento harcında GEO kaynaklı genleşmenin tespitinde kullanmıştır (Ramadan, 2000, Azzam, 2002, FHWA, 2002, Fu, 1996, Ceesay, 2004, Lane ve Özyıldırım, 1999, Fu ve Beaudoin, 1996c, Ekolu, 2004, Tagnit-Hamou ve Petrov, 2004). Deney yöntemi, buhar kürü sonrasında örnek üzerinde bir dizi termal ve hidrolik döngü yaratılması üzerine kuruludur. Şekil 3.31’ da yöntemin şematik gösterimi verilmiştir. Buhar kürü öncesi 2 saat ön bekleme, 20°C/saat hızla 85 dereceye ısıtma, bu sıcaklıkta 4 saat bekleme ve aynı hızda soğutma uygulanmaktadır. Buhar küründen sonra saf suda oda sıcaklığında üç gün bekletilen örneklerin boyu 3. gün sonunda sudan çıkartılıp ölçülmektedir. Duggan yöntemini kullanan bazı araştırmacılar bu noktayı başlangıç olarak kabul edip genleşmeleri hesaplamaktadır. Sudan çıkarılıp ilk ölçümü alınan örnek, 1 gün 82°C’de etüvde kurutulup tekrar suya yerleştirilmektedir. Bu işlem iki kez tekrarlandıktan sonra üçüncü kurutma süresi 3 gün olacak şekilde uygulanmaktadır. Kurutulmuş örneklerin boyu ölçülüp başlangıç noktası olarak alınmaktadır. Örneklerin su emerek yapacakları şişme değerleri de genleşmeye dahil edilmektedir. Su içinde bekletilen örneğin ölçümlerine 21 gün daha devam edilmektedir (Tagnit-Hamou ve Petrov, 2004). İsteğe göre daha uzun süre de devam edilebilir. Buhar küründen sonra toplan 30 gün işlem gören beton örnekler için Duggan, ASR ve iç sülfat kaynaklı genleşme riski açısından %0.05 genleşmeyi sınır değer olarak vermiştir. Çimento harcı ile yapılan çalışmalarda böyle bir sınır değer önerilmemiştir.

Duggan döngülerinde kılcal çatlak oluşmakta ve etrenjit oluşumu için uygun ortamın meydana gelme süresi kısalmaktadır. Kurutma dönemlerinde karbonatlaşma da olacağından monosülfatın karbonatlaşması ve etrenjit oluşumu hızlanmaktadır (Grabowski, 1998). Örneklerin saf suda beklemesi de alkali çıkışı ile etrenjit oluşumunu hızlandırıcı bir etkidir.

Bazı araştırmacılar deney şartlarının gerçekten uzak ve aşırı etkili olduğunu savunmuş ve yöntemi eleştirmiştir (Azzam, 2002, Ekolu, 2004). Örneğin, Azzam (2002), Duggan yönteminde önerilen sürenin, çimento harcı örnekleri için yeterli olmadığı, genleşme potansiyelinin ancak 1 yılda ortaya çıkabileceğini belirtmektedir.

Pavoine ve Divet (2003), Duggan döngülerinde farklı kurutma sıcaklıklarının genleşmeye etkilerini incelemiştir. Hazırladıkları deney düzeneklerinden elde ettikleri sonuçlar ışığında, Duggan döngülerinde daha düşük kurutma sıcaklıkları (38°C) kullanılmasının gerektiğini, yüksek sıcaklıkta kurutulan örneklerde GEO riski olmayan örneklerin de genleştiğini iddia etmektedir (Pavoine ve Divet, 2003). Ancak, düşük kurutma sıcaklıklarının etkili olamayacağını savunan, tersi sonuçlar da literatürde bulunmaktadır (Fu, 1996).

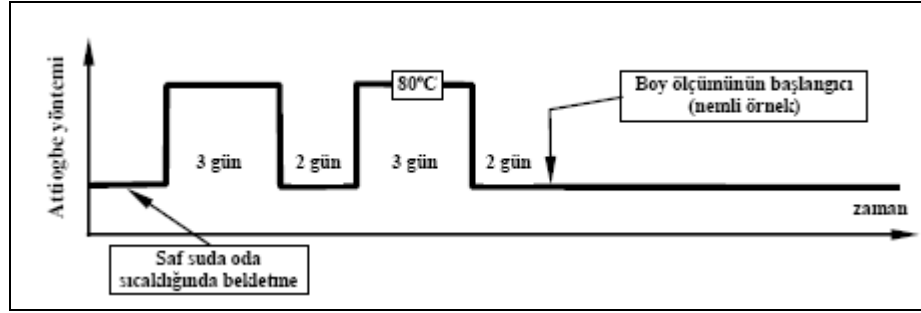


Şekil 2.31 Duggan yönteminin şematik gösterimi (Day, 1992).

Bu tez kapsamında yapılacak olan GEO tespitine yönelik deneylerde, Duggan yöntemi kullanılacaktır.

3.4.1.2 Attiogbe Yöntemi

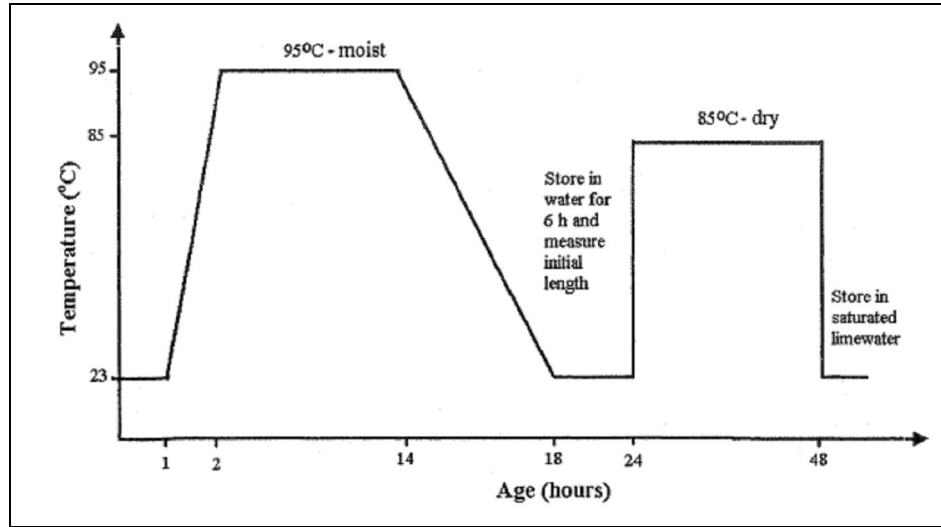
Duggan yöntemine çok benzeyen bir yöntemdir. Buhar kürü sonrası, ıslanma kurutma döngüsünde farklılık bulunmaktadır. Attiogbe yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.32' de verilmiştir. Suda iki gün bekleyen örnekler daha sonra üç gün 80°C 'de kurutulmaktadır. Bu döngü iki kez tekrarlanmaktadır. Ardından, su içinde iki gün daha bekletilen örneğin 12. günde ilk boy ölçümü alınmaktadır. Bu yöntemde, sudaki şişme değerleri genleşmeye katılmamaktadır. Yöntemdeki kuruma süresinin uzunluğu, karbonatlaşmanın harç bünyesinin daha derinlerine ulaşmasını sağlamak açısından etrenjit oluşumunu bir miktar artırıcı etki yaratabilir. Öte yandan devir sayısının azlığı kılcal çatlak miktarını azaltabilir. Her iki yönteminde, GEO'yu hızlandırmada olumlu ve olumsuz yanları bulunmaktadır.



Şekil 3.32 Attiogbe yönteminin şematik gösterimi (Day, 1992).

3.4.1.3 Fu Yöntemi

Fu yöntemi (1996), doğrudan GEO'yu hızlandırılmış tespite yönelik olarak geliştirilen bir yöntemdir. Deneyde; S/Ç oranı 0.48 olan ve boyut dağılımı belli kuvars kumu (ASR reaktivitesi olmayan) ile hazırlanan çimento harçları kullanılmaktadır. Çimento/kum oranı da 0,36'dır. Deney yönteminde sahada olması muhtemel buhar kürü hataları (acele küre başlama, hızlı ısıtma...) simule edilmeye çalışılmıştır. Yöntemin aşamaları Şekil 3.33' de verilmiştir. Buhar kürü öncesi bekleme süresi çok kısa (1 saat) ve ısıtma hızı ise çok yüksektir (72⁰C/saat). Bir saatte 23⁰C'den 95⁰C'ye çıkan kür sıcaklığı 12 saat bu sıcaklıkta bekletilmektedir. Soğutma hızı ise daha yavaştır (23⁰C'ye 4 saatte iniş). Örnekler soğuduktan sonra, 6 saat oda sıcaklığında kirece doymuş suda bekletilir. Sudan çıkartılan örneklerin ilk boy ölçümleri alınır. Böylece sudaki şişme genişleme hesaplarından çıkartılmış olur. Ardından 12 saat 95⁰C' de kurutulan örnekler tekrar kirece doymuş suya yatırılarak döngü tamamlanır. Fu (1996) bu yöntem kullanılarak elde edilen 42 günlük genişleme değerleri %0,035-0,040' dan yüksek ise, GEO kaynaklı genişleme riski olacağını iddia etmektedir. Ancak, böyle bir genelleme ancak çok sayıda farklı araştırmacı tarafından desteklenmesi halinde kabul görebilir. Fu yöntemi kullanılarak 42 günden çok daha sonra büyük genişleme değerleri ölçülen çalışmalar olmuştur (Zacarias, 2002). Böyle bir örnek ilerleyen sayfalarda sunulacaktır. Fu yöntemi (1996), buhar kürü etkileri açısından Duggan yönteminden daha şiddetli, kılcal çatlak oluşumu yaratma açısından daha zayıf bulunmaktadır. Ancak bazı araştırmacılar tarafından kullanılan bir yöntemdir (Zacarias, 2002, Fu, 1996, Grattan-Bellew ve diğer., 1998).



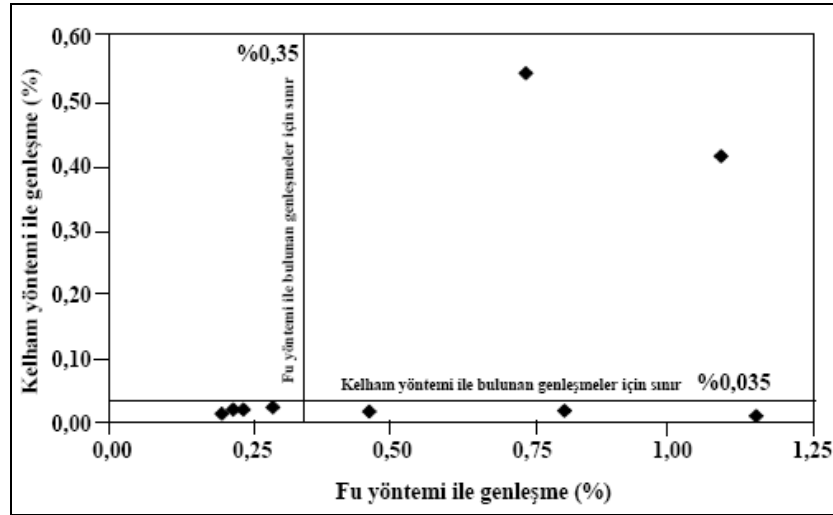
Şekil 3.33 Fu yönteminin şematik gösterimi (Ekolu, 2004).

3.4.1.4 Kelham Yöntemi

Kelham yönteminde (1996), Fu yöntemine göre daha hafif bir buhar kürü uygulaması yapılmaktadır. Buhar kürü; dört saat önbekleme ardından, 20°C/saat hızla ısıtma ve 12 saat 95°C'de bekleme, aynı hızla soğutma kademelerinden oluşmaktadır. Daha sonra herhangi bir döngü de yapılmadan, örnekler kirece doymun suda bekletilmektedir. Aslında yüksek kür sıcaklığı ve orta uzunluktaki kür süresi dışında, normal buhar kürü koşullarından fazla bir farkı yoktur. Zaten şu ana kadar sözü edilen yöntemler arasında en az genişlemenin ölçüldüğü yöntem Kelham yöntemidir.

Zacarias (2002), Fu ve Kelham yöntemlerini deneysel çalışmalarında karşılaştırmalı olarak kullanmıştır. Farklı özelliklere sahip çimento ve mineral katkılı harçlara, sözü edilen yöntemler uygulandıktan sonraki genişmelerini 1000-1400 gün boyunca takip etmiştir. Fu yöntemi kullanılan örneklerde genişleme artışları, kullanılan bağlayıcı özelliklerine bağlı olarak 56 ila 135 gün arasında yatay konum almıştır. 1400 güne kadar devam edilen ölçümlerde herhangi bir yeni hareket gözlenmemiştir. Diğer taraftan aynı örnekler Kelham yöntemi sonrasında nispeten daha az miktarlarda genişmiş, genişleme artışları örnekten örneğe değişmekle beraber 51 ila 345 gün arasında sabitlenmiştir. 1000 güne kadar devam edilen

ölçümlerde herhangi bir yeni hareketlenme, Kelham yöntemine maruz kalan örneklerde de gözlenmemiştir. Görüldüğü üzere, genişlemenin sabitleneceği zaman çok değişken olabilmekte, hızlandırılmış yöntemde bile bir yıl boyunca genişleme artışı devam edebilmektedir. Bu açıdan buhar kürü sonrası genişleme değerleri için sabit bir günde limit vermek çok olası görünmemektedir. Nihai genişleme değerleri ve her iki yöntem için belki de nihai genişleme için verilmesi daha uygun olan limit değerler Şekil 3.34’ de işaretlenmiştir. Kelham yöntemine göre GEO riski olmayan örnekler Fu yöntemine göre risk taşımaktadır. Bu açıdan örneklerin kendi aralarında karşılaştırılması çok sağlıklı değildir.



Şekil 3.34 Fu ve Kelham yöntemleri uygulanan farklı çimento harçlarının genişleme değerleri (Zacarias, 2002).

BÖLÜM DÖRT

ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU

Son yıllarda, agrega ile hidrate olmuş çimento harcı arasında artan sayıda zararlı kimyasal reaksiyon gözlenmiştir. Bu reaksiyonlardan yaygın olan bir tanesi de agreganın aktif silika bileşenleri ile genellikle çimentodan kaynaklanan alkaliler arasında olan reaksiyondur. Alkali silika reaksiyonu betonun boşluk suyundaki hidroksil iyonları ile agregada bulunan silisin belirli formları arasında oluşan oldukça kompleks kimyasal bir reaksiyondur (Hobbs,1988; Neville,1997; Akman,1998).

4.1 Alkali Silika Reaksiyonunun Tarihçesi

1920 ve 1930' lu yıllarda Kaliforniya'da birçok betonarme yapıda, yapım ve kullanılan malzemelerin kalitesi standartlara uygun olmasına rağmen, yapımlarından sonraki birkaç yıl içinde şiddetli çatlaklar gözlenmiştir. Bu tür hasara maruz kalan binalar arasında birçok okul binası, köprüler, otoyollar ve dalgakıranlar yer almaktaydı. 1930' ların sonlarında Amerikalı bir mühendis olan Stanton şans eseri bir yıl boyunca küçük bir kabın içinde kalan silindir harç numunelerinin yüzeylerinin, sonradan sodyum karbonat olduğu anlaşılan saçak şeklinde lekelenmeler ve beyaz çiçeklenmelerle kaplandığını görmüştür. Kısa bir süre içinde ise tüm numunelerin, araştırma altında olan yapılardakine benzer şekilde çatlaklarla kaplanmaya başladığı gözlenmiştir (Hobbs, 1988; Swamy,1992).

1940' da alkali agrega reaksiyonunun varlığı ilk kez Stanton tarafından betonun bileşenleri arasında oluşan içsel zararlı bir mekanizma olarak açıklanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, yüksek alkalili çimento ve çatlak görülen yapılarda kullanılan agrega tipiyle (opal) üretilen harç çubuğu örnekleri yüksek bağıl neme sahip ortamlarda bekletilmiş ve örneklerde genleşme ve çatlamlar tespit edilmiştir. Stanton çimento içeriği 600 kg/m^3 ' ün üstünde olan harç çubuklarıyla yaptığı

deneylerde, çimentonun asitte çözülebilir alkali içeriği (eşdeğer sodyum oksit içeriği) kütlece %0,6' nın altında ise, ASR nedeniyle bir genleşme ve çatlamanın ortaya çıkmadığı sonucuna varmıştır (Hobbs, 1988; Swamy,1992; Forster ve diğer.,1998).

1940' da yayınlanan Stanton' ın bildirisi, oldukça büyük bir ilgi toplamış ve daha sonra Amerika'nın diğer eyaletlerinde de betonarme yapılarda benzer bozulmalara rastlanmıştır. 1941' de Amerika'da Bureau of Reclamation, Stanton' ın çalışmasına dayanarak, beton barajlarda görülen bu tür çatlakları araştırmaya başlamıştır. Bu araştırmanın sonuçları da çimentonun alkali oranının, agreganın bileşiminin ve çevresel şartların (nem varlığı) ASR' nin gelişimi için gerekli koşullar olduğunu desteklemektedir. Bureau of Reclamation da önemli yapılar için çimentonun alkali içeriğini %0,6 ile sınırlamıştır. Günümüzde reaktif agrega kullanımı olasılığı olduğu durumlarda ASR riskini azaltmak için çimentonun alkali içeriğinin sınırlanması hala uygulanan bir yöntemdir (Hobbs, 1988; Forster ve diğer.,1998; Hobbs,1984).

Daha sonraki yıllarda öncelikle Amerika'da olmak üzere Avrupa, Kanada ve dünyanın farklı bölgelerinde birçok çalışmalar yapılmıştır. Bu alanda araştırma yapanlardan üçü önemli katkılarda bulunmuştur. Bu araştırmacılardan, Kanada' da Swenson alkali agrega reaksiyonunun karbonat içeren agregalarda da görülebileceğini bulmuştur, Danimarka'da Idorn Avrupa' da ilk alkali-silika reaksiyonu araştırmasını yapmıştır ve Avustralya' da Vivian' ın reaksiyon mekanizmasının anlaşılmasında büyük katkıları olmuştur (Swamy, 1992).

İngiltere'de ise alkali-silika reaksiyonu üzerine araştırmalar, 1950'li senelerde Building Research Station tarafından yapılmaya başlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda normal sıcaklıklarda ve yüksek alkalili çimento ile birlikte test edilen İngiliz agregalarının reaktif olmadığı görülmüştür. Ancak 1976'da yapılan çalışmalar sonucunda 1931 ile 1975 yılları arasında inşa edilen 200'ün üstünde yapıda ASR varlığına rastlanmıştır. Bu yapılar arasında köprüler, elektrik trafolarındaki temel blokları, kanalizasyon arıtma tesisleri, su depoları, dalgakıran, hastane, çok katlı

otopark, havalandırma bacası, yarış pisti yer almaktadır (Hobbs, 1984).

Stanton'ın ilk kez alkali agrega reaksiyonunu 1940'da açıklamasından günümüze kadar birçok yayın yapılmıştır. Diamond 1939-1991 yılları arasında 1300, bundan sonra da yüzlerce yayın yapıldığını belirtmiştir. İlki 1974'te, sonuncusu 2000 yılında olmak üzere 11 uluslararası konferans gerçekleştirilmiştir (Swamy,1992; Shehata ve diğer.,1999)

İzmir'de ise 1995 yılında bazı köprü ayaklarında görülen çatlaklar Karayolları Genel Müdürlüğü ve Japon Jica firması tarafından incelenmiştir. Araştırma sonucunda, özellikle Gediz ve Nif nehri yatak ve teraslarındaki doğal kumların içerdiği reaktif silislerin ASR'ye yol açtığı açıklanmıştır (Katayama, 1996).

4.2 Alkali Silika Reaksiyonu

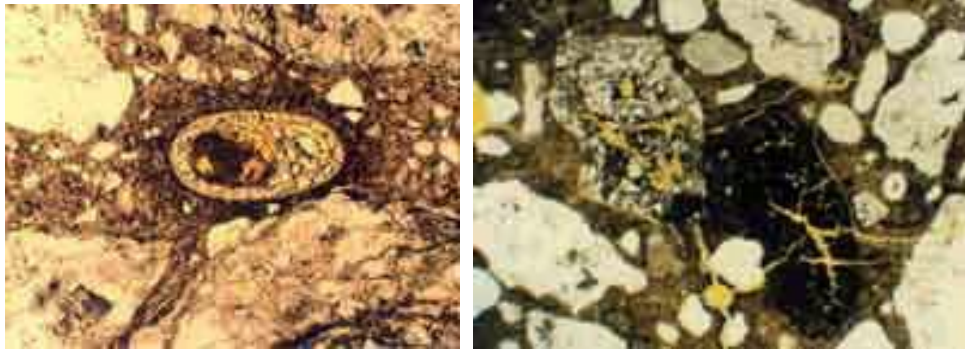
Bazı çimentoların içinde fazla miktarda bulunan sodyum oksit ve potasyum oksit alkali oksitleri beton boşluk suyunda çözünerek sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit oluştururlar ve aktif silis içeren agregalarla reaksiyona girerek, zamanla betonu çatlatan bir jel oluşumuna sebep olurlar. Reaksiyonun neden olduğu genleşme belirli bir sınırı aştığında beton için potansiyel bir tehlike oluşturur (Farny ve Kosmatka, 1997; Abit, 1998).

Genleşmeye neden olan ASR'nin oluşabilmesi için agregada reaktif silika formları, yeterli miktarda alkali (sodyum ve potasyum) ve ortamda nem bulunmalıdır. Bu koşullardan herhangi biri olmazsa ASR nedeniyle bir genleşme de olmayacaktır. ASR basitçe iki aşamada gösterilebilir:

1. Alkali + Reaktif silika \longrightarrow Alkali-silika jel ürünleri
2. Alkali-silika jeli + Nem \longrightarrow Genleşme

Betonda içsel gerilmelerin oluşumu, 1. Aşamadaki jel oluşumu ile eş zamanlı değildir. Bu nedenle jelin varlığı mutlaka ciddi boyutta ASR hasarının oluşması anlamını taşımaz. Genleşme ikinci aşamada ASR jel reaksiyonu ürünlerinin suyu absorbladığı zaman görülür. Ancak birinci aşama gerçekleşmeden dolayısıyla jel ürünleri oluşmadan genleşme oluşmaz.

Çimentonun hidratasyonu boyunca oluşan kalsiyum hidroksitlerin büyük bir kısmı kristal şeklinde, metal hidroksitlerinin büyük bir kısmı ise boşluk suyunda bulunurlar. Reaksiyon agregadaki silis minerallerine boşluk suyuna çimentodan gelen alkali hidroksitlerin saldırısı ile başlar. Sonuç olarak alkali-silikat jeli, agreganın boşluklarında, agrega partiküllerinin yüzeyinde ve agreganın zayıf bölgelerinde oluşabilir. Şekil 2.2'de jel oluşumu örnekleri görülmektedir. Jelin agrega yüzeyinde oluşması durumunda, agrega çimento harcı ara yüzeyindeki yapı değişir. Bu agrega ile çimento harcı arasındaki aderansı yıpratır, yok eder (Neville,1997).



Şekil 4.1 Demiryolu traversi ve bir betonarme binada oluşmuş ASR jelinin görünümü.

Reaksiyonun çatlama ve genişlemeyle sonuçlanması için gerekli üç koşulun yanı sıra bazı kritik sınır değerleri mevcuttur. Şöyle ki:

- a) Yeterli miktarda reaktif silika
- b) Silika hızlı reaksiyona giren türdense, belirli bir oranda bulunmalı
- c) Kritik seviyenin üstünde alkali
- d) Dış kaynaktan su girişi

Silikanın reaktif formlarından bazıları opal (amorf), kalsedon (kriptokristal), tridimidir (kristalin). Bu reaktif bileşenler opal veya kalsedonik çörtlerde, silisli kireçtaşlarında, riyolit ve riyolitik tüflerde, dazit ve dazit tüflerinde, andezit ve andezit tüflerinde ve filitlerde bulunur. Her silika partikülünün yüzeyi, artan düzensizlik ve yüzey alanı ile artan zayıf asit özelliği gösterir. Kuvars düzenli silikon-oksijen-tetrahedral yapısına sahip, normal şartlar altında stabil olan en yaygın silika türüdür. Opal ise silikanın en fazla düzensizliğe sahip en reaktif formudur ve molekül gruplarının arasındaki boşluklar ile tetrahedral yapı rastgele bir dizilişe sahiptir. Beton içinde alkalin ortamda silikanın ulaşılabilen yüzeylerinde asit/alkali reaksiyonu oluşmasıyla hidrate silikat meydana gelir. Hidroksil iyonları silika partikülleri tarafından emilir, bazı silikon oksijen bağları bu saldırı ile lokal olarak zayıflar. Sodyum ve potasyum katyonları ise elektriksel nötrlüğü sağlamak için silika partikülü içine difüze olurlar ve suyla da birleşerek jel kıvamındaki alkali-metal-iyon hidrate silikat ürününü oluştururlar (Hobbs,1988; Neville,1997).

Reaksiyonun oluşabilmesi için çimento alkali içeriğinin 'eşdeğer Na₂O' değeri olarak % 0.6 değerini aşması gerekir. Portland çimentosunun toplam alkali içeriği sodyum oksit eşdeğeri olarak aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$(Na_2O)_e = Na_2O + 0.658 K_2O \quad (4.1)$$

Betonda tek alkali kaynağı Portland çimentosu ise, çimentonun alkali içeriğinin sınırlanması, zararlı olan bu reaksiyonun ortaya çıkmasını önleyebilir. Bununla

birlikte bazı istisnai durumlarda çimento düşük alkali içeriğine sahip olmasına rağmen reaksiyonun oluştuğu gözlenmiştir. Birçok farklı kaynaktan beton içine alkali girişi söz konusu olduğu için, alkali içeriğinin sınırlanması gereklidir. İngiliz standardı BS 5328 reaktif agrega içeren 1 m³ betonda maksimum 3,0 kg/m³ alkali bulunmasını öngörmektedir (Neville, 1997; Forster ve diğer., 1998).

Genelde sadece çimento ve çimentolanma özelliği olan malzemelerin alkalinitesi göz önüne alınmaktadır. Ancak, betona katılan kimyasal ya da mineral katkıları alkali içeriyorsa gelen ilave alkali miktarı göz önüne alınır. Beton içine alkali girişi sadece çimentodan kaynaklanıyorsa alkali içeriği aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Farny ve Kosmatka, 1997) :

$$[\text{Çimento alkali \%}] * [\text{Çim. dozajı (kg/m}^3\text{)}] = \text{Betondaki alkali miktarı (kg/m}^3\text{)} \quad (4.2)$$

Nem, alkali iyonlarının yayılmasına, bu yayılma da reaksiyon bölgelerinde jel oluşumuna, oluşan jel ise su emerek şişip genişlemeye ve betonda içsel çekme gerilmelerinin doğmasına, böylece agrega ile onu çevreleyen çimento harcının çatlamasına neden olurlar. Çatlamadan sonra ortama giren su, jelin emebileceğinden fazla olursa bir miktar jel dışarı sızar, bu durum ileri düzeyde bir hasarın kanıtıdır. Su ASR' de iki rol üstlenmiştir, taşıyıcılığın yanı sıra jelin büyümesini de sağlar. Betonun kurutulması ve ileride su ile temasının önlenmesi reaksiyonun durdurulması için etkilidir. Aksine, tekrarlı ıslanma ve kuruma alkali iyonlarının göçünü hızlandırarak reaksiyonun şiddetini artırır.

ASR yalnızca nem varlığında gerçekleşir. Reaksiyonun devam etmesi için beton içinde minimum rölatif nem 20 °C' de yaklaşık %85'dir. Daha yüksek sıcaklıklarda reaksiyon bir miktar daha düşük rölatif nemde gerçekleşir. Genellikle daha yüksek sıcaklıklar ASR' nin gelişimini hızlandırır, ancak reaksiyon nedeniyle oluşan toplam genişmeyi çoğaltmaz. Sıcaklığın etkili olması, artan sıcaklıkla birlikte Ca(OH)₂' in çözünürlüğünün azalması ve silikanın çözünürlüğünün artması nedeniyle olabilir.

Sıcaklığın hızlandırıcı etkisinden agreganın reaktivitesinin belirlenmesi için yararlanılmaktadır.

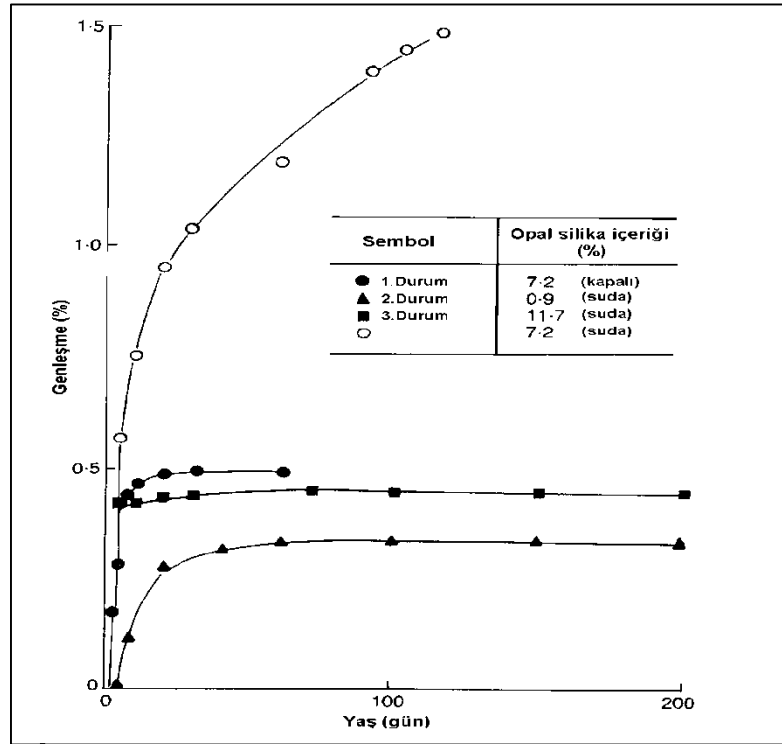
Betonda çimento dozajının $500-550 \text{ kg/m}^3$ ün üzerinde olması durumunda, kalıp alındıktan sonra kontrol altında saklanması ve dışarıdan su girişinin engellenmesi durumunda bile, betonun içindeki suyun ASR nedeniyle çatlak oluşturmaya yeterli olabilmektedir. Ancak normal şartlarda ASR' nin gelişimi için yapı elemanının bulunduğu ortamda, dış kaynaklı suya ihtiyaç vardır (Hobbs,1988).

Betonda boşluk suyu kalsiyum, potasyum, sodyum ve hidroksil iyonlarından oluşur. Sodyum, potasyum ve hidroksil iyonlarının konsantrasyonu hidrate olmamış Portland çimentosundaki sodyum ve potasyum bileşenlerinin miktarlarına bağlıdır. ASR, yalnızca yüksek hidroksil iyon konsantrasyonunda yani boşluk suyunun yüksek pH oranlarında ortaya çıkar. Çünkü reaktif silika ancak yüksek pH' lı çözültide çözünür. Boşluk suyunun pH değeri çimentonun alkali içeriğine bağlıdır ve çimentonun alkali miktarı arttıkça artar. Betonun Ca(OH)_2 dengesinin kurulduğu her noktada pH değeri en az 12,5'tur. Betonda boşluk suyunun pH değeri, yüksek alkalili çimentolar ile üretiliyse 13,5 ile 13,9 arasında değişirken, düşük alkalili çimentolar ile üretildiği durumda 12,7 ile 13,1 arasında değişmektedir. Yüksek ve düşük alkalili çimentoların pH değerleri arasındaki 1,0 derece fark hidroksil iyonu konsantrasyonunda 10 kat artışa sebep olur. Reaktif agregalarla düşük alkalili çimentoların kullanılması gereğinin temelinde bu neden yatmaktadır (Hobbs,1988; Neville,1997; Farny ve Kosmatka, 1997).

Oldukça küçük bir miktar reaktif silika Portland çimentosundan açığa çıkan tüm alkalileri tüketebilme özelliğine sahiptir. Reaksiyon hızı, reaksiyona giren bileşenlerin ilk bir araya geldiğinde en yüksek seviyededir, reaksiyona giren maddelerden birinin konsantrasyonunun artması durumunda veya sıcaklık artışında reaksiyon hızı da artmaktadır. Suya doygun betonda, oluşan jel su ve alkalileri

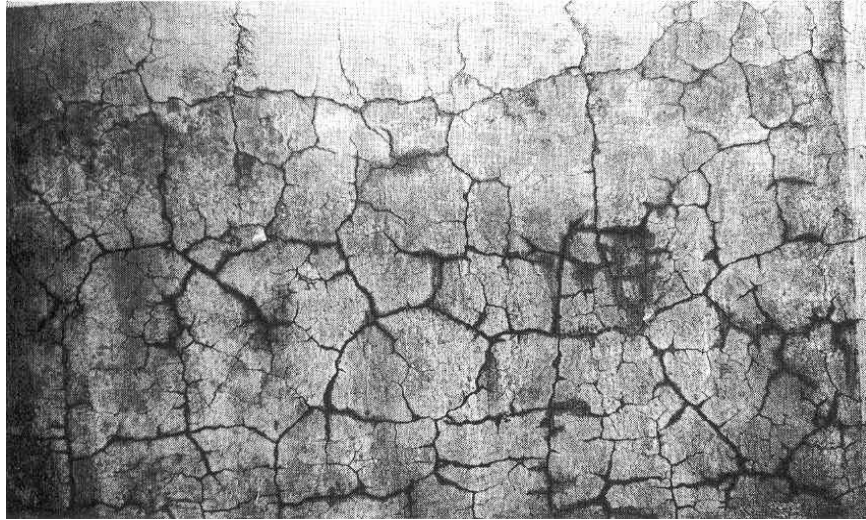
hidroksil iyonu konsantrasyonu seviyesine bağlı bir hızla emer. Beton doygun durumda değilse, betonun suyu emmesi buhar basıncına bağlıdır. Jel silika, kalsiyum, sodyum, potasyum ve su içermektedir. Oluşan jelin hacmi tüketilen silikadan çok daha fazladır. Jelin şişerek genişlemesiyle birlikte betonda içsel çekme gerilmeleri oluşur ve bu da betonda mikroçatlakların oluşumuna ve yayılmasına neden olur.

Reaktif silika miktarı aşırı ise genişleme alkali miktarının yeterliliğine bağlıdır. Reaksiyona giren maddelerden herhangi biri tüketildiğinde veya reaktif silikanın çözülmesine imkan vermeyecek şekilde hidroksil iyon konsantrasyonunun düşmesi halinde reaksiyon duracaktır. Genleşme de reaksiyona giren maddelerden biri tükendiğinde veya fiziksel bir denge kurulduğunda duracaktır. Şekil 4.2' de kimyasal ve fiziksel dengenin kurulması durumları için örnekler verilmiştir. İlk durumda reaksiyon ürünlerinin büyümesi gerekli su tüketildiğinde durmaktadır. İkinci durumda reaktif silika tüketilmiştir, üçüncü durumda ise metal alkali konsantrasyonu veya hidroksil iyonu konsantrasyonu sınır değer altına düşmüştür (Hobbs,1998).



Şekil 4.2 Reaksiyonda farklı koşullarda fiziksel ve kimyasal denge oluşumu (Su/çimento oranı 0.35, agrega/çimento oranı 1.0).

Jel hidrate olmuş çimento harcıyla sınırlandığı için, içsel gerilmeler oluşur, bu da genişmeye, çatlamalara ve hidrate olmuş çimento harcının bozulmasına, dağılmasına neden olabilir. Şekil 4.3' de ASR nedeniyle oluşan hasara bir örnek gösterilmektedir. Jelin beton içinde yayılırken uyguladığı hidrolik basınç nedeniyle oluşan genişmenin yanı sıra, ASR' nin katı ürünlerinin şişme basıncı da genişmeye neden olabilir. Bu nedenle, sert agrega partiküllerinin şişmesinin beton için oldukça zararlı olduğu düşünülmektedir. Kısmen yumuşak olan jelin bir kısmı, agreganın şişmesinden dolayı mevcut olan çatlakların içine su vasıtasıyla süzülmemektedir. Silisli partiküllerin boyutu reaksiyon oluşumunun hızını etkiler, ince danelerin (20 - 30µm) neden olduğu genişme birkaç ay içinde, daha büyük danelerin ise birkaç yıl sonra ortaya çıkar (Neville,1997; Hobbs,1988).



Şekil 4.3 Amerika'da Hoover barajında ASR nedeniyle oluşan çatlaklar.

Alkali silika jeli renksiz veya beyaz, kauçuğumsu, mumsu ve sulu bir kıvamdadır. Jel zaman zaman beton yüzeyine çıkabilir. Nem ve karbondioksit maruz kaldığı durumda karbonata dönüşebilir ve karbonat kurduğunda beton yüzeyinde beyaz bir görüntü oluşturur (Hobbs,1998).

Betonda ASR ürünleri (jel, reaksiyon halkası, kılcal boyutta agrega ve/veya çimento harcında çatlaklar, makro çatlaklar) oluşmadıkça ASR hasarından söz

edilemez. Ancak reaksiyon ürünlerinin olduğu her durumda da ciddi boyutta ASR hasarı oluşmamaktadır. Zira uzun süre hizmet vermiş ve hasar oluşmamış betonlarda da ASR ürünlerine rastlamak mümkündür (Farny ve Kosmatka, 1997).

4.3 Alkali Silika Reaksiyonunun Kimyasal Mekanizması

ASR' nin mekanizması ve oluşum süreci ile ilgili birçok çalışma yapılmasına rağmen tartışılan konular arasında yer almaktadır. En çok tartışılan konulardan biri alkali-silika jeli oluşumu üzerinde alkali katyonlarının (Na^+ , K^+) etkisidir. Birçok yazar boşluk suyundaki hidroksil iyonu konsantrasyonunun, ASR jelinin kompozisyonunu ve su emme kabiliyetini belirleyen boşluk suyundaki Na^+ , K^+ ve Ca^{2+} iyonlarının silikayla reaksiyona girme derecesini belirlemede kritik bir faktör olduğu düşüncesindedir. Ayrıca kalsiyumun ASR jelinin genleşme davranışını kısıtlayıcı yöndeki etkisi de araştırma konuları arasındadır (Wilson ve diğer., 1994).

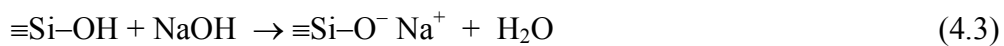
4.3.1 Reaktif Silikanın Çözünmesi

Silikanın farklı türlerinin temel yapı birimi silikon- oksijen tetrahedronudur. Kristal yapıya sahip kuartz türü silikalar, silikon-oksijen bağlarının bozulduğu küçük bölgeler içerse de, düzenli bir ağ yapısı oluşturacak şekilde birbirine bağlıdırlar. Buna karşın daha zayıf kristal yapıya sahip olan opal ve cam gibi silika türlerinde çok sayıda silikon-oksijen bağı bozulmuştur ve tetrahedral yapı rasgele dizilmiş, düzensiz bir ağ ile bağlıdır (Wilson ve diğer., 1994).

Silikon ve oksijen atomlarının düzensizliği ASR için uygun bölgeler sağlamaktadır. Silikanın reaktivitesi kristalinite derecesine (yapısal düzeninin derecesine) ve kesintili, bozuk silikon – oksijen – silikon ($\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$) bağlarının

sayısına bağlıdır. Opal en düzensiz yapıya sahip, dolayısıyla en reaktif mineraldir. Buna karşın, kuvars çok düzgün kristal yapıya sahiptir ve reaktif değildir (Wilson vd., 1994).

Silisin ana maddesi Si atomuna bağlı 4 oksijen atomundan oluşan silis tetrahedridir. Oksijen atomları bir valansları ile silisyuma bağlı kaldıklarından diğer valansları serbesttir, silis tetrahedrinin serbest 4 negatif bağı mevcuttur, SiO_4^{4-} tetrahedrinin su içinde çözünmesi, OH^- hidroksillerinin etkisiyle iki aşamada meydana gelir. Birinci aşama silisin hidrolizi sonucu uçlarının OH^- 'a dönüşerek çözünür hale gelmesidir, bu süreçte silisin yapısı değişmiş ve silisler birbirlerine hidroksil iyonları vasıtasıyla bağlanmışlardır. Bu yapıya silanol ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$) adı verilir. Silanol grupları OH^- hidroksillerinin ikinci saldırısı ile yeni bir çözülmeye maruz kalırlar ; ortama H_2O molekülleri vererek $=\text{Si}-\text{O}-$ formuna dönüşür ve su içinde dağılırlar. OH^- iyonları çözünmede katalizör görevi görmektedirler. OH^- hidroksilleri çimentonun hidratasyonu sırasında ortaya çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sayesinde meydana gelirler, ancak sadece kirecin etkisi boşluk suyunun pH değerini 13,5-14,0 değerine yükseltmeye yetmez. Bunun için NaOH , KOH gibi alkali hidroksitlerin varlığı da bu yüksek alkaliniteyi sağlamak için gereklidir. Örneğin NaOH çözeltisinde birinci aşama şu şekilde gerçekleşir (Akman,1998; Wilson vd., 1994) :



Bu reaksiyon silikon – oksijen bağlarının çekim gücünü zayıflatır. NaOH konsantrasyonu arttıkça daha fazla silikon – oksijen bağı kırılır ve silika tanecikleri koloidal bir yapıya dönüşür. İkinci aşama ise şu şekilde gerçekleşir :



Burada $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ a siloksan adı verilir. Bu mekanizmaya göre Na^+ iyonları silika yapısına bağlanarak, ASR' nin oluşumunda aktif olarak görev alır (Wilson vd., 1994).

Silisin çözülmesinde, çözünmenin hangi hızla geliştiğini saptamak önemlidir. Hızı etkileyen birinci faktör sıvının agrega taneciği içine olan difüzyonudur. Difüzyon hızları agreganın boşluk yapısına ve sıvının iyon konsantrasyonuna bağlı olarak değişir. Difüzyon başlangıçta zamanın kareköküyle gelişir, çökelen veya yıkama sonunda kalan tıkaçıcı tuzlar difüzyonu yavaşlatır. Yavaş gelişen çözünme uzun zaman alır. Daha sonra çözünme sıvı-katı fazlar arasında bir yüzey reaksiyonuna dönüşür ve zamanla lineer artarak hızlanır (Akman, 1998). Çözünme hızı üzerinde sıvı ortamdaki hidroksillerin katyon türlerinin de etkisi vardır. Bu hız yavaştan hızlıya doğru şu şekilde sıralanmaktadır :

(LiOH \cong CSOH) < (RbOH \cong NaOH) < KOH. Burada katyonların efektif (hidrat) yarıçapları etkinlik taşır. Potasyum en küçük efektif iyon çapına sahiptir ve sodyum iyonlarından daha hızlı çözünürler. Bu yüzden potasyum içeriği fazla olan çimento sodyum içerikli çimentoya göre daha erken alkali-silika genişmesi gösterir (Akman,1998; Chatterji ve diğer.,1988).

Çözünme hızını etkileyen diğer iki faktör ortamın pH derecesi ve sıcaklığıdır. pH> 5 seviyesinden itibaren hız artmakta, pH > 10'dan sonra anlam kazanmaktadır. Bazı araştırmalar bu arada çözünmenin bir minimum değerden geçtiğini belirtmektedir. Çözünürlük 45°C ve 55°C arasında da artmaktadır. Bu durum hidratasyon ısısı kolaylıkla düşmeyen kütleli baraj betonlarında önem taşır (Farny ve Kosmatka, 1997).

4.3.2 Alkali Silika Jelinin Oluşumu ve Bileşimi

Alkali silis jelinin kimyasal formülü ve oluşumu hakkında kesin sonuçlara varılamamıştır. Ortamdaki Ca⁺⁺ iyonları bu oluşumu miktar ve birleşim yönünden etkilemektedir. Jelin zamanla kristal bir yapıya dönüştüğü saptanmıştır.

Alkali silika jelinin bileşimi alkali boşluk suyunun bileşimine, silikanın reaktivitesine, reaksiyona giren maddelerin konsantrasyonuna ve reaksiyon sıcaklığına bağlı olarak değişir. Silanol gruplarının oluşmasından sonra jel oluşumu safhaları şu şekilde olmaktadır (Wang & Gillott,1991) :

1. Alkalice zengin boşluk suyunda akışkan jelin oluşumu:



2. Agrega tanelerinde oluşan akışkan jelin genişlererek çevredeki çimento harcına doğru akması ve burada giderek daha rijit kalsiyumca zengin bir jele dönüşmeye başlaması:



Bu reaksiyon mekanizması süresince, reaktif silis içeren agrega yüzeyinden çimento harcına doğru kalsiyum içeriği artmaktadır. Jelde SiO_2 ve CaO miktarlarının eşit olduğu durumda alkali içeriği maksimumdur. Tablo 4.1' de birçok araştırma sonucu elde edilen alkali silika jellerinin kimyasal analiz ile bulunan bileşimleri verilmektedir (Swamy,1992; Wang & Gillot,1991).

Tablo 4.1 Alkali silika jelinin kimyasal analizi.

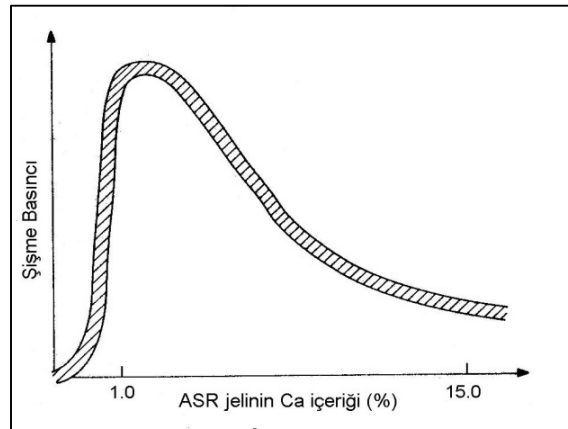
Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Referans
12.9	-	53.9	2.9	0.6	Stanton (1942)
12.9	-	53.4	2.6	0.8	
14.9	5.2	61.7	0.6	-	Idorn (1961)
13.4	5.1	65.5	0.5	0.2	
12.4	4.9	69.9	0.3	0.5	
17.9	8.2	73.7	1.1	0.1	
9.4	4.1	72.8	1.3	0.2	
14.6	6.2	61.9	-	0.1	
16.2	5.7	56.8	-	-	
8.2	4.1	56.1	17.4	0.2	
1.2	0.4	51.4	29.9	10.0	Poole (1975)
7.4	0.7	53.0	22.1	10.0	
1.5	13.9	38.9	27.3	-	Gutteridge&Hobbs (1980)
0.4	4.7	51.1	21.5	-	Regourd (1983)
-	0.6	27.9	35.2	-	
1.0	6.9	61.5	9.2	-	Oberholster (1983)
1.0	6.2	53.8	8.2	-	
1.8	5.5	49.9	12.8	-	
1.0	5.2	50.4	12.0	--	
1.4	9.0	62.9	12.5	-	
0.8	7.4	53.2	10.0	-	
1.2	4.1	66.5	6.5	-	Baronio (1983)
3.7	12.9	43.3	21.8	0.8	Mullick&Samuel (1986)
3.9	11.7	49.4	15.9	0.5	

Dent Glasser ve Kataoka CaO varlığının silis jeli oluşumundaki etkisini incelemişlerdir. Ca²⁺ iyonları silisle birleşerek yüksek kristallik gösteren bir silikat hidrata (CSH) dönüşmekte ve jel yüzeyinde birikmektedir. Eğer boşluk suyunda Ca⁺² iyon konsantrasyonu sınırlıysa, Ca⁺² çabuk tükenmesi sonucu reaksiyon durmaktadır. Betonda hidratasyon başında Ca(OH)₂ kristalleri agrega harç arayerine çökelirler,

ancak arayer sıvısındaki Ca^{+2} iyonları silisle reaksiyona girip harcanınca agrega yüzeyine $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalleri tekrar çözülmeye başlarlar ve arayer sıvısındaki dengeyi kurarlar. $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ oranı jelin oluşmasında, bileşiminde ve genişmesinde önemli rol oynar. Bu oran arttıkça karakteri değişen jel daha az genişme yapan bir türe dönüşür (Farny ve Kosmatka, 1997).

4.3.3 Alkali Silika Jelinin Genleşmesi

Reaktif silika ve alkaliler nem varlığında birleşerek su emerek şişen alkali-silika jelini oluştururlar ve bu jelin hasara yol açan özelliği genişme niteliğine sahip olmasıdır. ASR jelinin şişme özelliğine sahip olup olmaması boşluk suyundaki Na^+ , K^+ , Ca^{2+} iyonlarının miktarına bağlıdır. Jelin viskozitesini arttırması açısından kalsiyum, jelin şişme basıncını etkilemektedir. Eğer kalsiyum konsantrasyonu düşükse, reaksiyonun ilerlemesi ve genişmenin oluşabilmesi için öncelikle kalsiyum miktarının artması gerekmektedir. Düşük viskoziteli (düşük kalsiyum içerikli) ASR ürünleri çimento harcı içinde şişme basıncı yaratmadan yayılmaktadırlar. Ancak kalsiyum içeriği arttıkça Şekil 4.4' de görüldüğü gibi belirli bir değerden sonra şişme basıncında bir pik noktadan sonra düşüş görülmektedir (Akman,1998;Wilson,1994).

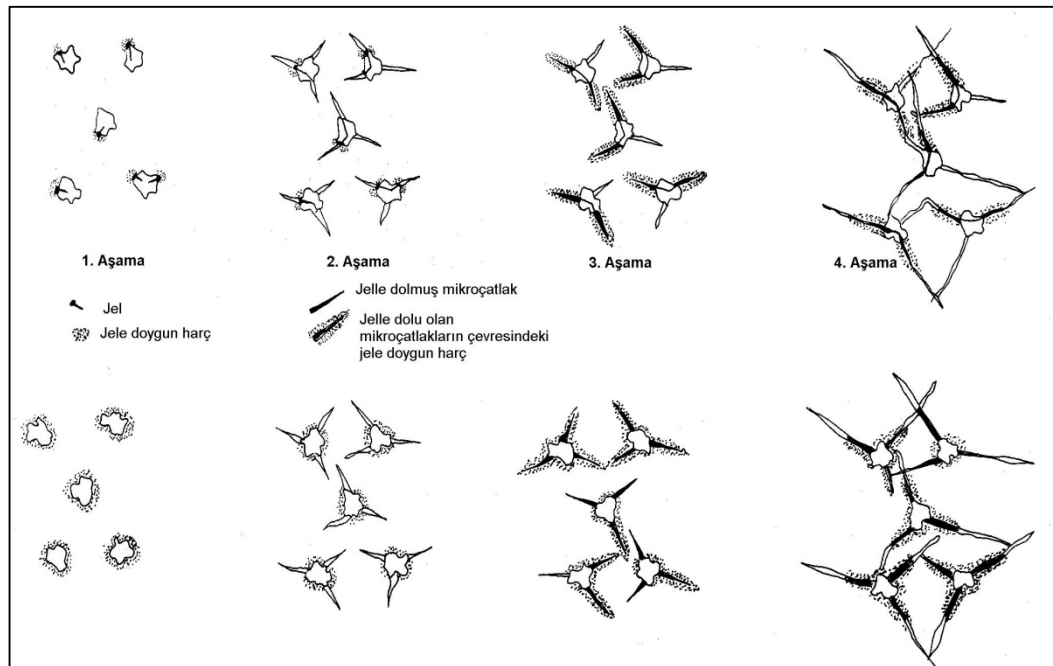


Şekil 4.4 ASR jelinin Ca içeriği ile şişme basıncı arasındaki ilişki.

Genleşme mekanizmasını açıklamak üzere farklı teoriler geliştirilmiştir. Prezzi (1997) genleşmeyi kolloid kimyasındaki çift elektriksel tabaka teorisiyle açıklamaya ve modellemeye çalışmıştır. Sıvı içindeki katı yüzeylerde iyon izomorf yer değişimi, kimyasal reaksiyonlar veya iyon adsorpsiyonu sonucu elektriksel yük birikimleri oluşmaktadır. Çimento harcına değen ilk iyon tabakası sabittir ve katı yüzeydeki negatif yüklerin tutabildiği pozitif iyonlardan oluşur. İkinci tabaka ise artakalan pozitif ve boşluk suyundaki negatif yüklerden meydana gelir. İkinci tabaka daha geniştir ve çimento harcından uzaklaştıkça elektriksel potansiyel azalır. Her iki tabakadaki yüklerin cebrik toplamı sıfırdır. İkinci tabakanın yük durumuna bağlı olarak genişliği arttıkça katı kısım (çimento harcı) çevresinde şişme meydana gelir. Tabakanın genişlemesi alkali katyonların tabaka içinde artmasıyla belirginleşir (Akman, 1998).

ASR' nin neden olduğu genleşme mekanizmasını açıklayan diğer teoriler ise emme teorisi ve osmotik hücre basıncı teorisidir. Emme teorisinde beton içinde oluşan gerilmeler boşluk suyunun emilimiyle jelin büyümesine dayandırılmaktadır. Genleşme jelin hacim yoğunluğuna, büyüme hızına ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Jelin büyümesi yavaşsa, beton içinde jelin yayılması ile birlikte içsel gerilmeler artmaz. Ancak hızlı bir büyüme varsa, jelin lokal olarak ani büyümesi ile içsel gerilmeler betonun genleşmesine ve çatlamasına neden olabilecek bir seviyeye yükselebilir. Şekil 4.5' de içsel gerilmeler nedeniyle farklı aşamalarda çatlak oluşumu gösterilmektedir. 1. aşamada jel içsel gerilmelere neden olarak büyümektedir ancak mikro çatlaklar henüz oluşmaz, 2. aşamada mikro çatlaklar oluşur, 3. aşamada jel mikro çatlakların içine sızar, küçük bir miktar genleşme oluşur ve gerilmelerde yavaş bir artış vardır. Son aşamada ise jelle dolu mikro çatlakların çevresinde oluşan içsel gerilmeler çatlakların yaygınlaşmasına neden olur ve büyük genleşmeler meydana gelir (Hobbs,1988).

Osmotik hücre basıncı teorisinde ise beton içinde oluşan gerilmeler geçirimsiz membranın diğer tarafında gelişen hidrolik basınca dayandırılmaktadır. Hansen çimento harcının silika iyonlarına karşı geçirimsiz bir membran olarak davrandığını öne sürmektedir. Bu yüzden membran su, hidroksil ve alkali metal iyonlarının içeri doğru geçişine izin vermektedir, ancak silika iyonlarının difüzyonuna izin vermemektedir. Bu koşullar altında reaksiyon alanı sınırlanmış harca karşı artan basınçla güç uygulamaktadır. Hansen' a göre boşluk suyunun membrana doğru difüzyonu ayrıca reaksiyonu hızlandıracaktır (Hobbs,1988).



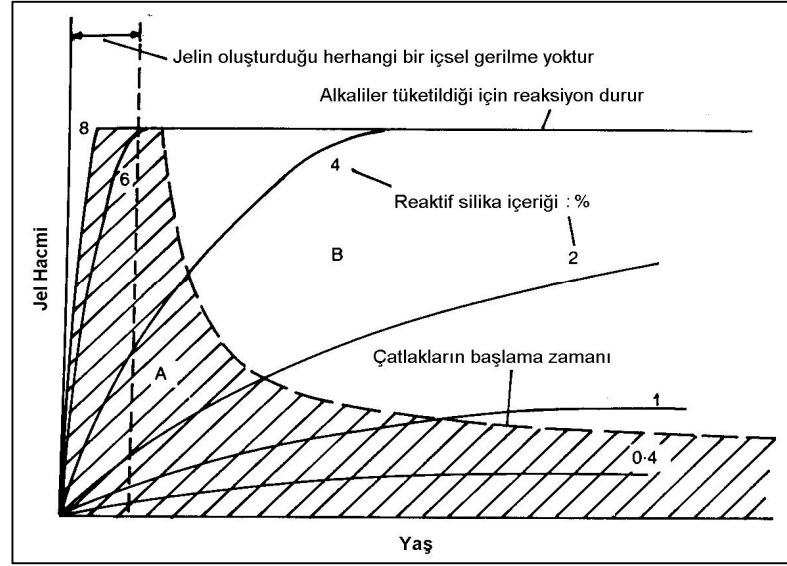
Şekil 4.5 ASR çatlaklarının modellenmesi.

Hudec de genişmeyi osmotik basınçla açıklamaktadır. İnce taneli dokuya sahip olan reaktif agregaların aktif yüzeyleri büyüktür. Genellikle negatif yüklü olan bu yüzeyler boşluk suyundaki Na^+ , K^+ , Ca^{++} iyonlarını çekerler, bu katyonlarda beraberlerinde boşluk suyunda bulunan hidroksil iyonlarını sürüklerler. Böylece silisin çözünmesi süreklilik kazanır. Alkali içeriği yönünden zenginleşen silisin çevresi konsantrasyon dengesini kurmak için dış bölgeden osmotik yolla su moleküllerini çeker, suyun oluşturduğu osmotik basınç genişlemeye yol açar (Akman,1998).

4.4 Pesimum Davranış

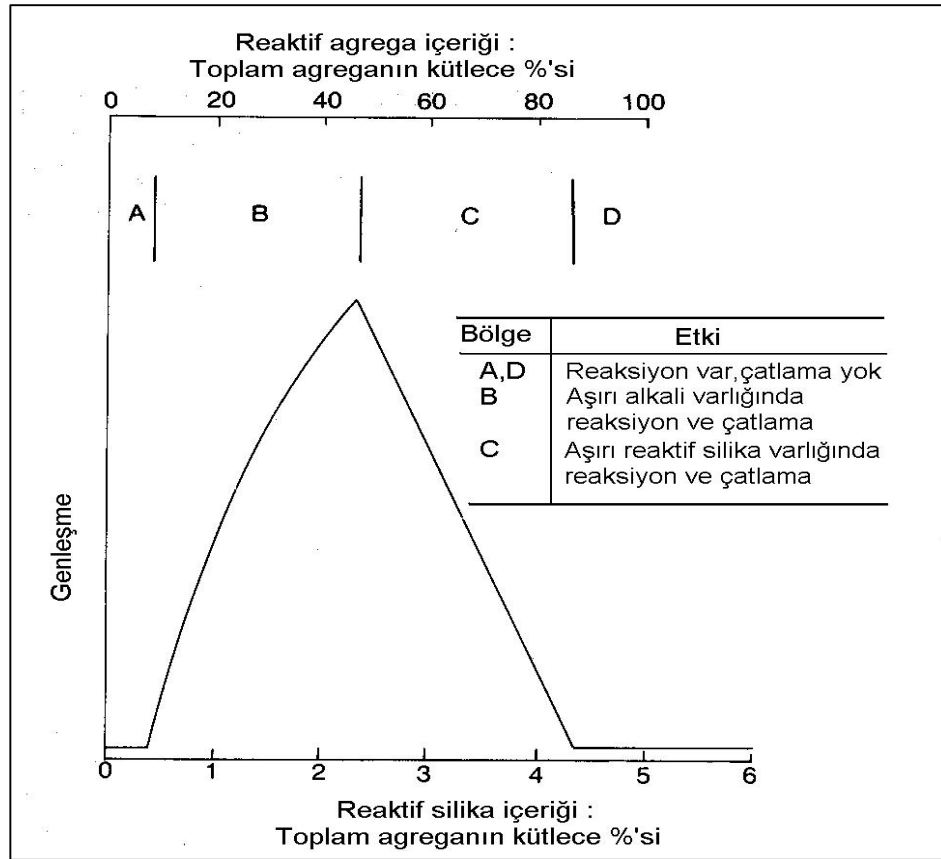
Yeterli miktarda alkali, reaktif agrega ve nem varlığında ASR oluşmaktadır. Agregadaki reaktif silis içeriğinin belirli bir değerinde genleşme maksimuma ulaşmaktadır. Bu değer pesimum oran olarak isimlendirilir. Benzer olarak Ozol' a göre alkali içeriği için de maksimum genleşmeyi veren bir pesimum değer vardır. Silikanın pesimum oranı, düşük su/çimento oranlarında ve yüksek çimento dozajlarında daha yüksek değerler alır. Şekil 4.6' da farklı reaktif silika içerikleri için jel hacminin zamana göre gelişimi gösterilmektedir. Şekilde A bölgesinde genleşme ve çatlama yoktur, B bölgesinde ise çatlakların oluşmasından sonra jel hacmine bağlı olarak genleşme oluşmaktadır (Hobbs,1988; Swamy,1992; Neville,1997).

Genellikle pesimum oran ile ilgili araştırmalar reaktif agreganın farklı oranları için sabit alkali içeriğiyle yapılmaktadır. Alkali içeriğindeki farklılıklar da reaktif silis içeriğinin etkisine benzer bir şekilde pesimum etki üzerinde etkili olmaktadır. Alkali konsantrasyonu ile reaktif agrega miktarının birlikte oluşturduğu kritik oran harç veya beton içindeki reaktif malzemenin yapısına ve örnek içinde boşluk suyunun hareket kabiliyetine bağlıdır. Bu hareket ise betonun boşluk oranı ve geçirimsizliğinden dolayısıyla su/çimento oranından etkilenmektedir (Swamy,1992).



Şekil 4.6 Jel hacmi ile reaktif silika içeriği arasındaki ilişki.

Pesimum davranış reaktif silis bileşenlerinin hızlı reaksiyona giren türden olması durumunda kendini göstermektedir. ASR nedeniyle olan genleşme reaktif silika içeriği bir maksimum değere ulaşana kadar artar, ancak sonra bu değerden sonra reaktif silika içeriği artmaya devam ederken, genleşmelerde azalmalar görülür. Şekil 4.7' de reaktif agregadaki opal içeriği ve agregaya içeriği ile genleşme arasındaki ilişkide pesimum davranış görülmektedir.



Şekil 4.7 ASR' de gözlenen pesimum davranış.

Şekil 4.7, A' dan D' ye kadar dört bölgeye ayrılmıştır. A bölgesinde, reaktif silika içeriği düşüktür ve beton sertleştikten sonraki jel büyümesi çatlaklara neden olmaz. B bölgesinde, reaksiyon beton sertleştikten sonra devam etmektedir ve reaksiyonun şiddeti çatlaklara neden olabilecek derecededir. Genleşme reaktif silikanın tümü tüketildiğinde ve reaksiyon seviyesi yeteri kadar düştüğünde durur. Bu bölgede fazla miktarda alkali vardır ve reaksiyon ürünlerinin bileşimi muhtemelen alkali/ reaktif silika oranından bağımsızdır. C bölgesinde, reaksiyon beton sertleştikten sonra da devam eder, çatlaklar oluşur ve genleşme boşluk suyundaki alkaliler bir eşik değerin altına düştüğünde veya tüketildiğinde durur. Bu bölgede fazla miktarda reaktif silika bulunmaktadır ve azalan alkali/reaktif silika oranı ile birlikte reaksiyon ürünlerinin alkali/silika oranı ve su emme miktarı azalmaktadır. D bölgesinde, reaktif silika miktarı çok fazladır ve reaksiyon o kadar hızlıdır ki beton sertleştğinde jelin büyüme oranı çok yavaştır, dolayısıyla çatlama neden olmaz. Beton üzerinde herhangi bir zararlı etki yaratmaksızın fazla miktarda jel oluşabilir.

Pik genişlemenin olduğu safhada, reaktif silika miktarı hidroksil iyonu veya alkali konsantrasyonunu bir eşik değere indirmeye ve mevcut sodyum ve potasyum alkalilerini tüketmeye yetecek kadardır.

4.5 Alkali-Silika Reaktivitesinin Belirlenmesi

Yüksek alkali içeren betonlarda agreganın iyi bir performans gösterdiğine dair uzun süreli gözlemlere dayanan sonuçlar varsa reaktivite tespiti için ayrıca deney yapmaya gerek yoktur. Aksi halde, agreganın veya belirli agrega-kombinasyonlarının zararlı alkali-silis reaksiyonu gösterip göstermeyeceğinin tespiti için deneyler yapmak gerekmektedir. Alkali-silis reaktivitesi hakkında günümüzde hala uluslararası kabul görmüş tek bir veya birkaç standart deney yöntemi bulunmamaktadır. Ülkeler, kendilerine en uygun deney metotlarını seçerek uygulamaktadırlar. Laboratuvar deneylerinin bazılarında reaksiyon, anormal yüksek çimento içeriği, alkali ekleme veya yüksek sıcaklıklarda test edilerek hızlandırılmaktadır. Test metotları, bu sebeple iki ana faktör göze alınarak değerlendirilmelidir. Birincisi, bu tür anormal koşullarda bazı silisli bileşenler normal koşullarda olduğundan çok farklı hızlarda reaksiyona girebilirler. İkincisi, reaksiyonun fiziksel etkileri çok farklı olabilir. Bu deneyler ancak, şantiye koşullarıyla veya normal şartlarda kürlenmiş numuneler üzerinde yapılan deneylerle karşılaştırıldığında anlamlı sonuçlara götürebilir (Ramyar vd, 2002).

4.5.1 ASTM C 295- Agregaların Petrografik Analizi

Petrografik inceleme, minerallerin cins ve yüzdelere göre kayacın adlandırılması işlemidir. Agregalardan alınan ince kesitlerin optik mikroskop yardımıyla incelenmesi sonucu içeriklerinde bulunan potansiyel reaktif mineral fazların (reaktif silis) teşhisi mümkündür. X-ışını yayılımı ve tarayıcı elektron mikroskobu gibi yöntemler reaktif silisin saptanmasında faydalıdır. Agregaların yanısıra, zarar gören beton ve harç numunelerden alınan ince kesitler üzerindeki çalışmalar sonucu, meydana gelen etkinin ASR sebebiyle olup olmadığını tanımlayabilmek mümkündür. Petrografik incelemeyi yapan kişinin bu konudaki deneyimi önemli bir faktördür. ASR üzerinde kimyasal metotlar, beton veya harç numuneleri ile testler uygulamadan önce bu analizin uygulanması zaman kazandırmak ve uygulanacak metodun agrega tipine göre seçimini kolaylaştırmak bakımından önemlidir (ASTM C- 295, Ramyar, 2002).

4.5.2 ASTM C 227- Harç Çubuğu Metodu

Bu metot, belirli şartlarda kürlenmiş harç numunelerinin belirtilen süre sonucundaki boy değişimlerinin (genleşme yüzdesi) ölçülerek çimento-agrega kombinasyonlarının reaktivitelerinin belirlenmesi esasına dayanır. Belirtilen gradyasyonda agrega elenerek agrega/çimento oranı 2.25 ve akma değeri % 105-120 arasında olacak şekilde bir harç karışımı hazırlanarak 25x25x285 mm boyutundaki prizmatik kalıplara dökülür. Genellikle, alkali içeriği kütlece % 1.0 ile % 1.2 eşdeğer Na₂O olan çimento kullanılır. 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılan numunelerin boyları ölçülür. Numuneler, 38⁰ C derece sıcaklıkta ve kenarlarında ortamı nemli tutan fitil görevi gören kurutma kağıdının bulunduğu kapalı kaplarda nemli ortamda (su üzerinde) saklanır ve periyodik olarak ölçümleri alınır. Genleşme limitleri üç numunenin ortalaması alınarak, 6 ayda % 0.10 veya 3 ayda % 0.05'tir. 6 aylık genleşme limitlerinin sınır değeri aşması halinde oluşan genleşmenin ASR sebebiyle

olduğunun kesin değerlendirilmesinin yapılabilmesi için ek deneyler yapılması önerilir. Deney sonuçları, kullanılan kabın tipi, fitillerin bulunup bulunmayışı, çimentonun alkali içeriği, su/çimento oranı gibi faktörlerden önemli miktarda etkilenmektedir.

Bu yöntemin dezavantajları, uzun süreli olması, kür koşullarındaki farklılıklar sebebiyle değişimler gösterebilmesi ve özellikle bazı yavaş reaktif agregaların reaktivitelerinin saptanamamasıdır. Bu yöntem, ayrıca mineral ve kimyasal katkıların ASR genişmesindeki azaltmalarını ölçmede de kullanılmaktadır (ASTM C 227; Ramyar ve diğer.,2002).

4.5.3 ASTM C 441- Mineral Katkıların veya Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliklerini Ölçen Standart Deney Metodu

Bu metot, mineral katkılarının veya yüksek fırın cürufunun agregalarla çimento alkalileri arasındaki reaksiyon sonucu meydana gelebilecek zararlı genişmeleri önlemedeki etkinliğini inceler. Pireks camı reaktif agregası ile mineral katkı veya cüruf içeren çimento kombinasyonları kullanılarak hazırlanan harç çubuklarının standart kür koşullarında, belirli periyotlardaki genişmeleri değerlendirilir. Önce, 400 gr yüksek alkalin çimento ile belirli gradasyondaki 900 gr preks camı agrega kullanılarak kontrol karışımı hazırlanır. Bu karışımın 14 günlük minimum genişmesi % 0.250 olmalıdır. Cüruf dışındaki mineral katılarda 300 gr yüksek alkalin çimento ile mutlak hacmi 100 gr çimentoya eşit miktarda (100 x mineral katkının yoğunluğu / 3.15) mineral katkı kullanılır. Kullanılan katkı cüruf ise mutlak hacmi 200 gr çimentoya eşit miktarda (100 x cürufun yoğunluğu / 3.15) kullanılır. Belli durumlar için şantiyede kullanılacak oranlarda çimento-katkı karışımları ile şantiyede kullanılacak alkalitede çimento kullanılabilir. Numunelerin döküm, kütleme ve ölçüm işlemleri ASTM C 227'deki gibidir. Deney süresi sonunda kontrol

numunesi ile katkı içeren numuneler arasındaki “genleşme miktarındaki azalma” değeri yüzde cinsinden hesaplanır. ASTM’ ye göre, genleşme miktarındaki azalma değerinin % 75 veya daha fazla olması halinde kullanılan mineral katkı miktarı uygundur. Belirli bir çimento agrega kombinasyonunun kullanılması halinde ise 14 günlük maksimum genleşme değeri % 0.02 olarak belirlenmiştir. Bu metodun eleştirildiği konular; pireks camı gibi çok yüksek reaktivitedeki bir malzemenin doğal agrega gibi davranmadığı ve bu sebeple gerçekçi sonuçlar alınamayacağı ve pireks camının değişken kompozisyona sahip, ortalama alkali veren bir malzeme olması sebebiyle alkali katkısının deney sonuçlarını etkileyebileceğidir. (ASTM C 441; Ramyar ve diğer., 2002).

4.5.4 ASTM C 1293- Beton Prizma Metodu

Bu deneyin amacı, beton prizmalarının boy değişimi ile agregaların alkali reaktivitesi hakkında fikir edinmektir. Daha önce agregaların petrografisi ile ilgili bilgi edinilmesinde fayda bulunmaktadır. Deney uygulanacak agrega ince agrega ise reaktif olmayan kaba agrega ile karıştırılarak kullanılır. Kaba agreganın reaktivitesi ölçülecek ise reaktif olmayan ince agrega ile karıştırılıp belli gradasyona getirilen malzeme 75x75x287 mm kalıplara dökülür. Numunelerin çimento içeriği 420 kg/m³ olup su/çimento oranı 0,42 ile 0,45 arasında işlenebilirliği sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Kullanılan çimentonun eşdeğer Na₂O içeriği, karışım suyuna NaOH eklenerek çimentonun kütlece %1,25’ine yükseltilir. 24 saat sonra kaptan çıkarılan numunelerin ilk boy ölçümleri alındıktan sonra 38⁰C derece sıcaklıkta, nemli ortamda (su üzerinde) standartta belirtilen şekilde saklanır. Saklama kabında fitil kullanımını bu yöntemde de mevcuttur.

Genleşme limitleri üç numunenin ortalaması alınarak, 1 yıllık periyot sonunda %0.04 olarak belirlenmiştir. Bu metot genelde diğer test metotlarına ek olarak kullanılmaktadır. Direk olarak beton üzerine uygulandığından gerçeğe daha yakın

sonuçlar vermekte ve bu sebeple diğery deney metotları yetersiz kaldığında kullanılmaktadır. Yine bu metot, mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmelerine etkisi hakkında en gerçekçi sonuçları vermektedir (ASTM C 1293; Ramyar ve diğery.,2002).

4.5.5 ASTM C 1260- Hızlandırılmış Harç Çubuğı Metodu

Bu metot, kür şartlarını ağırlaştırarak reaksiyonu hızlandırmakta ve agregaların reaktivitesinin 16 gün içinde tespitine olanak vermektedir. Uygulamadan önce agregaların petrografik analizinin ve limitlerin üzerinde genleşme görüldüğü taktirde önceki metotlarda belirtildiğı şekilde reaktivitenin ASR sebebiyle oluşup oluşmadığının incelenmesi önerilmektedir. Standartta belirtilen gradasyondaki agrega, kütlece çimentonun 2.25 katı kadar kullanılarak su/imento oranı 0.47 olan harç karışımı hazırlanır. 25x25x285 mm boyutlarındaki kalıplara dökülen harç numuneleri 24 saat sonra kalıplardan alınarak ilk boyları ölçülür. Kalıplarda numune üzerine yapışarak suyun difüzyonunu önleyebilen standart kalıp yağları yerine teflon sprej gibi artık bırakmayan tipte kayganlaştırıcı materyal kullanılır. Kalıp sökümünden itibaren 1 gün süreyle 80⁰ C derece suda bekletilerek boy ölçümleri alınan numuneler, takip eden 14 gün boyunca 80⁰ C derece 1N NaOH çözeltilisinde bekletilir ve periyodik ölçümleri alınır. Standart, çimentonun alkali miktarı hakkında bir değer vermemektedir, bunun nedeni kür koşulları nedeniyle numunelerin boşluk çözeltilisi alkalinitesinin artmasıdır.

Toplam 16 gün süren deney sonucunda, genleşme yüzdeleri şöyle değerlendirilir; 16 gün sonundaki genleşmeler, % 0.10 değerinin altıdaysa agregalar zararsız davranış göstermektedir. 16 gün sonundaki genleşmeler, % 0.20 değerinin üstündeyse agregalar potansiyel olarak zararlı genleşme gösterirler. 16 gün sonundaki genleşmeler, % 0.10 ile % 0.20 değerinin arasındaysa agregalar, şantiye koşulları altında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilirler. Karar vermeden

önce ek deneylerle genleşme sebebinin araştırılması ve ölçümlerin 28 güne kadar uzatılması önerilmektedir. Bu metot, kür koşulları oldukça ağır olduğundan tatmin edici şantiye performansı gösteren bazı agregaların da reaktif olarak tanımlanabilmesi gibi bir probleme yol açabilmektedir. Yine de deney süresinin kısa olması ve pratikliği sebebiyle araştırmalarda daha çok tercih edilmektedir (ASTM C 1260; Ramyar ve diğer, 2002).

4.5.6 Jel Pat Metodu

Bu metotta agrega örneği koyu kıvamda çimento hamurunun içine gömülür ve yüzeyi bilerek agrega parçalarının açığa çıkması sağlanır. Alkalın çözeltiliye batırılan hamur, stereoskopik mikroskop ile periyodik aralıklarla incelenir. Deney, 20⁰C sıcaklıkta veya yükseltilmiş sıcaklıklarda uygulanabilmektedir. Agregada opal silis içeren bileşik olması halinde birkaç gün içinde jel oluşumu gözlenebilir. Bu metot, petrografik mikroskop altında incelenemeyecek kadar ince dağılımlı reaktif silisin ortaya çıkarılmasına imkan verir. Bu deney sonucunda reaktif olabileceği izlenimi veren agrega hakkında yeterli saha performansı olmadığı takdirde beton veya harç prizma yöntemlerinden birinin uygulanması önerilmektedir (Ramyar ve diğer., 2002).

4.5.7 Alman Çözünme Metodu

Bu metot, opal ve flint içeren agregaların potansiyel alkali reaktivitesini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Seçilen tanecik boyutundaki agregalar (1-2 mm) 90 C derecede 4 M NaOH çözeltisinde 1 saat boyunca bekletilir, kurutulup tartılan agregalardaki kütlece kayıp, “alkalide çözülebilir” olarak adlandırılmaktadır. Böylece agreganın alkalın ortamdaki kimyasal kararsızlığını ortaya koymakta fakat

çeşitli çimento kombinasyonlarıyla birlikte davranışını ve genleşme yaratıp yaratmayacağını belirleyememektedir. Ayrıca, 1 mm boyutunun altındaki agreganın potansiyel reaktiviteye katkısını gözönüne almamaktadır (Ramyar ve diğer., 2002).

4.5.8 Ozmotik Hücre Metodu

Ozmotik hücre, agrega parçacığı ile çimento ara yüzeyinin modellemesidir. Ozmotik hücre, her biri 1N NaOH çözeltisi içeren iki adet odacıktan oluşmaktadır. Odacıklar, su/çimento oranı 0.55 olan çimento hamuru zarı ile birbirlerinden ayrılır. Reaksiyon odası adı verilen odacıkta 150-300 mm boyutlarında, 12.40 gr ağırlığında agrega parçacıkları bulunmaktadır. ASR oluştuğunda çözelti, çimento hamuru membranının içinden “havza odacığından” , “reaksiyon odacığına” doğru akar. Her odacığın üst kısmındaki ince borucuklardaki çözelti miktarındaki değişim, bu akışın miktarını ve hızını ölçmeye imkan tanımaktadır. Günde 1.5-2.0 mm gibi bir akış hızı, agreganın potansiyel olarak reaktif olduğunun göstergesidir. Ters bir akış gözlenmesi, agreganın reaktif olmadığını işaretidir. Bu deney normal reaktif bir agregada 30-40 gün devam ederken hızlı reaktif agregada 2-3 günde sonuç vermektedir. Bu metot, reaktivitenin hızlı değerlendirilmesine imkan vermektedir. Gelişme deneyleri ile birlikte kullanılması faydalıdır (Ramyar ve diğer., 2002).

4.5.9 Otoklav Metotları

Bazı araştırmacılar, harç veya beton numuneleri yüksek sıcaklık ve basınç altında alkali çözeltisinde veya suda kaynatarak yada buhar kürüne tabi tutarak agregaların reaktivitesini ölçmek için metotlar öne sürmüşlerdir. Bu konuda standart bir deney yöntemi olmamakta ve numune boyutlarından kullanılan malzeme miktarına ve kür koşullarına kadar pek çok faktör değişiklik göstermektedir. Amaç, boy değişimi ve çatlakların incelenerek agregaların reaktivitesinin belirlenmesidir (Ramyar ve diğer.,

2002).

Bu yöntemler dışında pek çok farklı araştırma metodu mevcuttur. Kimyasal büzülme metodu, Duggan genleşme metodu vb. Önemli olan nokta; agregalar değerlendirilirken, uygulanan deney yöntemleri öncelikle agreganın saha performansı verileriyle, veri yoksa diğer deney metotlarıyla karşılaştırmalı olarak test edilmesi gerekliliğidir. İlk olarak yapılacak petrografik analiz, agregaların seçimi ve reddinde kullanılacağı gibi, müteakip deney metotlarının seçimi hakkında da fikir verecektir. Hızlı deney metotları arasında istatistiksel olarak en güvenilir test metodu, hızlandırılmış harç çubuğu metodudur. Uzun süreli metotlar arasında en gerçekçi sonuçları ise beton prizma metodu vermektedir.

4.6 Mineral ve Kimyasal Katkıların ASR'ye Etkileri

4.6.1 Mineral Katkıların ASR'na Etkisi

Mineral katkıları, kendi başına bağlayıcı özellik taşımayan, ince öğütüldüğünde ve nemli ortamda çimento hidrasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler oluşturan silisli veya silisli-alüminli malzemelerdir.

Günümüzde, sertleşmiş betonda ASR sebebiyle meydana gelebilecek zararlı genleşmeleri kontrol etmesi mümkün olan tüm metotlar arasında puzolanik veya mineral katkıların kullanılmasının betonun durabilitesini ve ASR etkilerine karşı direncini arttırması bakımından avantajlara sahip olduğu kabul edilmiştir. Beton imalatında mineral katkıların ana malzemelerden biri olarak kullanımı, kar sağlamanın yanısıra teknik, enerji tasarrufu ve çevrenin korunumu açısından da faydalar sağlamaktadır. Mineral katkıların ASR genleşmesini azaltmasında hangi mekanizmanın baskın olduğu netlikle anlaşılmasa da şu teoriler dikkate alınmaktadır;

1. Katkı maddeleri, Portland çimentosundan daha az reaktif oldukları ve daha düşük oranlarda alkali açığa çıkardıkları için seyreltici görevi görürler. Katkı içeren karışımlar, sadece çimento içeren karışımlara nazaran daha yüksek efektif su/çimento oranına sahiptirler ve su da alkali içeriğinin daha da seyrelmesine yol açar. Bazı mineral katkılarda ise çimentodan daha fazla çözünebilen alkali bulunmaktadır. Bu tür katkılar kullanıldığında yararlı etki görülmeyebilir.

2. Mineral katkılar, boşluk ve agrega-çimento arayeri iyileştirmesi yaparak daha düşük geçirimsizliğe yol açmaktadır. Bu sayede, alkalilerin reaktif agregaya göçü yavaşlamaktadır.

3. Katkı maddeleri, çimento hamurundaki Ca(OH)_2 içeriğini azaltarak pH'ını düşürmektedir. Ancak pH'ın, Ca(OH)_2 , C-S-H ve boşluk çözeltisi arasındaki denge ile belirlendiği ve bunların tek başlarına miktarlardan bağımsız olduğu belirtilmiştir.

4. Katkı maddesi içeren sistemler, alkalileri sadece Portland çimentosu ile hazırlanan karışımlardan daha güçlü bir şekilde bağlarlar. Portland çimentosu hamurunda C-S-H'nin tipik Ca/Si oranı 1,8 iken mineral katkı kullanıldığında bu oran düşmektedir. C-S-H'nin yüzeyindeki yük, Ca/Si oranına bağlıdır, bu oran yüksek olduğu takdirde C-S-H'nin yüzey yükü pozitif olmakta ve C-S-H liflerinde anyonlar emilmektedir. Bu durumda Na^+ ve K^+ gibi katyonlar boşluk suyunda kalırlar. Ca/Si oranı 1,2 – 1,3' den düşük olduğunda C-S-H'nin yüzey yükü negatif olur ve C-S-H ile alkali katyonları birleşir (Ramyar ve diğer., 2002).

Mineral katkıların etkinliği incelenirken uygulanan deney yöntemleri de önem taşımaktadır. Hızlandırılmış harç çubuğu metodunda harç numunelerinin tabii tutulduğu kür koşulları, doğada betonların maruz kaldığı koşullardan çok daha şiddetlidir. Bu deneye tabii tutularak reaktif olduğu belirlenen bazı agregalar, normal servis koşullarında betonda genişleme göstermemişlerdir. Bu sebeple, anılan yöntemle reaktivitesi belirlenen agregalar üzerinde başka deneylerin de uygulanması

önerilmektedir. Ancak mineral katkıların etkinliğini karşılaştırmalı olarak belirlemede, hızlandırılmış harç çubuğu metodu, bu amaç için uygun ve hızlıdır.

ASR' nin oluşabilmesi için betondaki alkali miktarı da önem taşımaktadır. Alkaliler; çimentodan, katkılardan ve dış kaynaklardan gelebilirler. Genellikle düşük alkalın mineral katkıları, yüksek alkalilere nazaran boşluk çözeltisi alkali konsantrasyonunu, dolayısıyla da genleşmeyi azaltma bakımından daha etkilidir. Dışarıdan devamlı alkali girişi söz konusu olduğunda (hızlandırılmış harç çubuğu yönteminde olduğu gibi) mineral katkının alkali içeriği ikinci plandadır ve puzolanik aktivite sonucu geçirimsizliğin azalması olayı ön plana çıkar (Ramyar ve diğer., 2002).

4.6.1.1 Uçucu Külün ASR'na Etkisi

Termik santrallerde, elektrik enerjisinin üretimi için toz haline getirilmiş kömür yakılmaktadır. Kömürün yakılması sonucu çeşitli gazlar ve yanmamış atıklar ortaya çıkar. Açığa çıkan kömür külünün yaklaşık %80'i baca gazıyla beraber uçar. Bu küller, atmosfere salıverilmeden bacalardaki filtreler tarafından tutulur. Bunlar literatürde "uçucu kül" (UK) olarak adlandırılırlar. Uçucu küllerin ana kimyasal bileşenleri; silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3)'tür. Uçucu küller, çeşitlerine göre farklı miktarlarda kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO), sülfürtrioksit (SO_3) ve yanmamış kömür parçacıkları (karbon, (C)) içerirler. Uçucu kül puzolanik özellik gösterir. Yüksek oranda (%10'dan fazla) CaO içeren uçucu kül puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özellik de gösterir.

ASTM C 618'e göre uçucu kül, C sınıfı ve F sınıfı olmak üzere ikiye ayrılır. F sınıfı uçucu külün $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriği %70'ten fazladır. Antrasit veya bitümlü kömürden elde edilir. Sadece puzolanik özellik gösterir. C sınıfı uçucu külün $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriği %50'den fazladır. Linyit ya da sibbitümlü kömürden üretilir. Kireç içeriği %10'dan fazla olabilir. Puzolanik ve bağlayıcı özellik taşır. Uçucu külün kireç içeriği %10'un üzerindeyse "yüksek kireçli uçucu kül" olarak

adlandırılır.

Uçucu kül, katkılı çimento üretiminde kullanıldığı gibi betonda belirli oranlarda çimento veya ince agrega yerine de kullanılmaktadır. Taze betonda sabit su/çimento oranında işlenebilirliği artırır. Sertleşmiş betonda ise dayanım kazanma hızını yavaşlattığından erken yaşlardaki dayanımı düşürürken ileri yaşlardaki dayanımı artırır. Ayrıca, puzolanik özelliği sayesinde oluşturduğu ikincil C-S-H' larla yapıyı daha yoğun hale getirir, agrega-harç arayerini iyileştirir ve bu sayede betonun geçirimsizliğini azaltır. Bu sebeple, çeşitli kimyasal ve fiziksel etkilere karşı betonun durabilitesi artar (Ramyar ve diğer., 2002).

Alkali-silika reaksiyonu, betonda uçucu kül gibi bazı puzolanların yeterli miktarda kullanılmasıyla geciktirilebilmekte veya önlenmektedir. Puzolanların ince taneleri içindeki silis çimento hamuru gözenek sıvısındaki alkalileri hızla bağlayarak yoğunlukları ve sıvının pH değerini azaltır. Bu durumda gözenek sıvısında azalan alkalilerin agregadaki reaktif silis ile reaksiyona girmeleri zorlaşır. Ayrıca, katkılı hamurda geçirgenliğin azalmış olması da olumlu etki yapmaktadır (Yeğinoğlu, 2002).

4.6.1.2 Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) ASR'na Etkisi

Demir cevherinden demir üretimi esnasında yüksek fırında kireçteşi veya dolomit varlığında erimiş cüruf oluşur. Bu cüruf, erimiş haldeki demirin üzerinden akar ve ayrık halde depolanabilir. 1500-1600⁰C sıcaklığında eriyik cüruf yaklaşık olarak %30-40 oranında SiO₂ ve %40 oranında CaO içerir, ki bu Portland çimentosunun kompozisyonuna benzemektedir. Çukurlarda yavaşça soğutulursa kristalleşerek melilit veya mervinit minerallerini oluşturur. Bu mineraller çok az hidrolik değer taşıdığından beton agregası veya yol temel tabakası olarak kullanılabilirler. Suda granüle edilerek hızlıca soğutulduğunda camsı bir yapı oluşturur. Bu camsı yapı kurutulmuş öğütüldüğünde hidrolik özellik kazanır. Bu yapı, hidrate olmak için

alkalin bir ortama ihtiyaç duyar, ancak silis dumanı ve F sınıfı uçucu kül gibi kirece ihtiyaç duymaz (Ramyar ve diğer., 2002).

Yüksek fırın cürufunun bağlayıcı madde olarak betonda kullanımı, istenilen özelliklere bağlı olarak toplam bağlayıcı maddenin %20'si ile %80'i arasında değişebilmektedir. Betonda kullanımın önemli faydaları; işlenebilirliği arttırması, priz süresini geciktirmesi, hidrasyon ısısını ve kanamayı azaltması, 7 günden sonraki dayanımı arttırması, yoğun bir yapı oluşturarak geçirimsizliği arttırması ve sülfat etkisi ile ASR gibi durabilite problemlerine karşı dayanıklı bir yapı oluşturmasıdır. Bunun yanı sıra özellikle soğuk havalarda prizin yavaşlaması, daha fazla hava sürükleyici katkıya ihtiyaç duyulması ve erken yaşlardaki dayanım kayıpları yüksek fırın cürufu kullanımının dezavantajlarıdır.

4.6.1.3 Doğal Puzolanların ASR' na Etkisi

“Puzolan” terimi gerçekte şiddetli yanardağ patlamaları sonucu oluşan camsı piroklastik malzemeler için kullanılır. Literatürde uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi yapay malzemeler içinde “yapay puzolan” terimi kullanılmaktadır. Kil, şeyl ve zeolit gibi betonda kullanılan doğal malzemeleri de “doğal puzolanlar” olarak gruplandırmak mümkündür. Puzolanların genleşme yaratan reaksiyonlara karşı etkili oldukları bilinmektedir. Kireç-puzolan reaksiyonunda boşluk çözültüsü pH' ının düşmesi sonucu puzolanlar etkili olur. Ayrıca, reaktif puzolanlar alkalilerle reaksiyona girerek alkalileri tüketirler ve genleşme yaratmayan ürünler oluştururlar. Puzolanların ASR' unu azaltmadaki etkisi, puzolanların reaktivitesine bağlıdır ve bu etki çimento yerine kullanılabilir miktarı belirler (Ramyar ve diğer., 2002).

4.6.2 Kimyasal Katkıların ASR' na Etkisi

Belli kimyasal katkıları potansiyel olarak;

- Silisin çözünmesini durdurabilir veya azaltabilirler,

- Alkali-silis jelinin oluşmasına engel olur ve karakterini değiştirebilirler,
- Jelin genişmesini azaltabilirler (Ramyar ve diğer., 2002).

4.6.3 Kimyasal ve Mineral Katkıların Birlikte Kullanımı

Mineral ve kimyasal katkıların birlikte veya tek başına ASR üzerindeki etkisi kimyasal ve fiziksel faktörlerin kompleks bir sonucudur. Priz geciktiriciler, hava sürükleyici katkılar ve silis dumanının ASR üzerinde fiziksel etkisi vardır. Priz geciktiriciler, çimento hamurunda rijit bir mikro yapının oluşmasını geciktirirler ve uzun süre plastik kalmasını sağlarlar. Bunun sonucu, erken yaşlarda ASR sebebiyle oluşan genişleme basınçları, çimento hamuru zarara uğramadan karşılanır. Katkılı çimento hamurları daha fazla ince gözenek taşımakta ve toplam gözeneklilik de bu sayede artmaktadır. Silis dumanı içeren çimento hamurlarında, 7 gün gibi kısa bir sürede boşluklar arasındaki devamlılık azalmakta, dolayısıyla hamurun geçirimsizliği de azalmaktadır. Bu sayede, alkali reaktivitesi yüksek olan agregaların nemi emmesi de engellenmektedir. Hava sürükleyici katkılar, çimento hamurunda büyüklükleri 10-1000 mm arasında değişen boşluklar oluşturmakta ve bu hava boşluklarına jelin yayılması sebebiyle genişmede azalma olmaktadır.

Mineral ve kimyasal katkılar, çimento hamurundaki kimyasal prosesleri de etkilerler. Ca(OH)_2 'in oluşumunu ve gelişimini engellerler ve erken yaşlarda kalsiyum silikatların hidrasyon hızını düşürerek daha az Ca(OH)_2 'in oluşmasını sağlarlar.

Ayrıca kalsiyumu tüketen etrenjit oluşumunun hızını arttırırlar. Sukroz içeren priz geciktirici katkı kullanıldığında portland çimentosunun boşluk çözeltisindeki Ca/Si oranı düşmektedir. Silis dumanı ise Na, K, Ca ve OH iyonlarını çabucak tüketerek ikincil C-S-H oluşturur, bunun sonucu olarak puzolanik reaksiyon ile ASR, ortamdaki kireç ve alkalileri tüketmek için yarışa girer. Bilindiği gibi kalsiyum,

alkali ve hidroksil iyon konsantrasyonlarını düşüren katkılar genleşme potansiyelini de azaltmaktadır. Silis dumanı ve priz geciktiriciler ayrı ayrı kullanıldığında kalsiyum, alkali ve hidroksili tüketerek genleşmeyi azaltmaktadır. Bu iki tip katkı birlikte kullanıldığında genleşmedeki azalma, ayrı ayrı kullanıldığı zamanki ile hemen hemen aynıdır. Bunun sebebi, genleşmeyi azaltma mekanizmalarının aynı olması ve birlikte kullanıldıklarında destekleyici başka bir mekanizmanın oluşmamasıdır. Hava sürükleyici katkılar ise basıncı azaltan hava boşlukları oluşturmalarının yanı sıra alkali-silika jelinin yüzey gerilimini ve viskozitesini etkileyerek su emme kapasitesini ve akışkanlığını değiştirirler. Hava sürükleyici katkı, priz geciktirici ve silis dumanı ile birlikte kullanıldığında, ayrı ayrı kullanımlarından daha iyi bir etki gözlemlenmektedir. Bunun sebebi, birlikte kullanılan bu katkıların farklı mekanizmaları yardımı ile ASR genleşmesini azaltmalarıdır. Mineral ve kimyasal katkıların betonda birlikte kullanılmaları halinde katkının etki mekanizmasının farklı olacağı göz önünde tutularak bu malzemelerin betonda kullanım miktarları önceden deneylerle saptanmalıdır.

BÖLÜM BEŞ

KLOR GEÇİRİMLİLİĞİ VE KAPİLER SU EMME

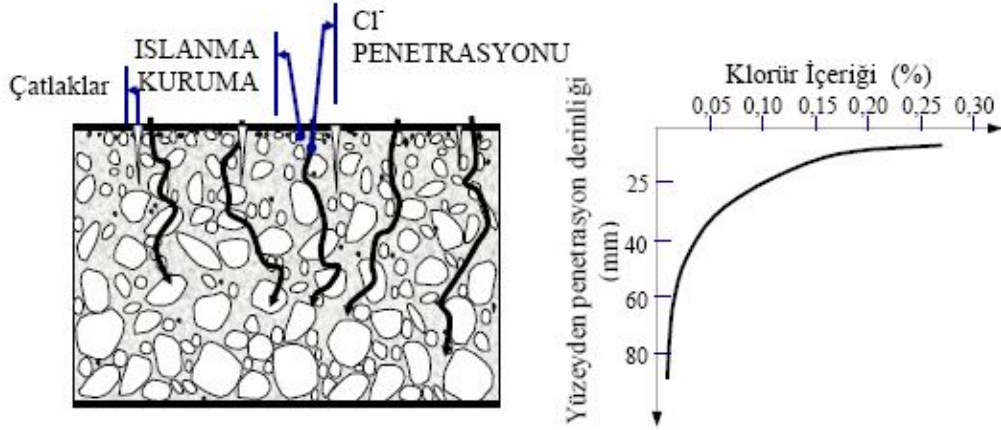
5.1 Klor Geçirimsizliği

Günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesi olan beton, servis ömrü boyunca dış kuvvetlerin ve çeşitli çevresel etkilerin altındadır. Bunlar: fiziksel, kimyasal veya fiziko-kimyasal ve mekanik etkilerdir (Hengül, ve diğer., 2003). Uygulamada beton, fiziksel ve kimyasal birçok etkiye tekrarlı olarak maruz kalabilmekte ve bu etkiler bir diğerinin gelişimini hızlandırabilmektedir (Baradan ve diğer., 2002). Örneğin, yüzey aşınması ve çatlaklar sebebiyle oluşan kütle kaybı, betonun kimyasal bozulmasına yol açan geçirgenliği artırır (Mehta ve Monteiro, 2005). Benzer şekilde betonun kimyasal süreçlerle bozulması sonucu gözenekliliğinin artması, aşınma gibi fiziksel etkilere dayanıklılığını büyük ölçüde azaltabilmektedir (Baradan ve diğer., 2002). Örneğin, çimento hamuru bileşenlerinin, su ya da asidik sıvılarla yıkanması, betonun gözenekliliğini artırır. Bu durum, betonu aşınma ve erozyona karşı savunmasız bırakır (Mehta ve Monteiro, 2005).

Klorürler beton bünyesine CO₂ gibi difüzyon yoluyla girerler. Beton içinde ilerleme hızları karbonatlaşma olayındakine benzer olarak zamanın karekökü ile ilişkilidir.

Klorür iyonları beton içine çeşitli yollardan girebilir. Bunlar arasında, yüksek miktarda klorür içeren agregaların kullanılması, CaCl₂ içeren priz hızlandırıcı ya da su azaltıcı kimyasal katkı maddelerinin kullanılması, deniz suyunun karışım suyu olarak beton üretiminde kullanılması sayılabilir. Ayrıca, çimentoda hatta içme suyunda bile 250 ppm'e varan miktarlarda klorür iyonu bulunabilmektedir. Ancak en yaygın görülen durum çevrede bulunan klorürlerin beton içine taşınmasıdır. Klorürlerin beton içine taşınımı kapiler emme, suyla birlikte ilerleme ve difüzyon süreçleriyle gerçekleşir. Islanma-kuruma bu süreçlerin gelişimini büyük oranda hızlandırır. Şekil 5.1' de görüldüğü gibi, zamanla beton içinde, yüzeyden derinlere inildikçe azalan bir klorür iyonu dağılımı gözlenir. Tuzlu suyun kapiler yolla

emilimi, difüzyon periyotları, ıslanma-kuruma döngüsü Cl konsantrasyonunu ve Cl işleme derinliğini artırır (Baradan ve diğer., 2002).



Şekil 5.1 Klor iyonlarının betona girişi (Baradan ve diğer., 2002).

Beton klorür iyonlarının bir kısmını fiziksel ve kimyasal olarak bağlayabilmektedir. Bu nedenle, beton içindeki klorür iyonları bağlı ve serbest klorür olarak ikiye ayrılır. Kimyasal bağlama sırasında çimento bileşenleri ve klorürler arasındaki reaksiyondan Friedel tuzu adı verilen yeni bir ürün meydana gelir. Fiziksel bağlama jel boşluklarında klorür iyonlarının adsorbe edilmesiyle gerçekleşir. Donatının korozyonu açısından suda çözünen serbest klorür miktarı önemlidir. Bağlı ve serbest klorür iyonları arasında normal şartlarda beton içinde bir dengenin teşekkül ettiğini, karbonatlaşma gibi dış sebeplerle, kimyasal olarak bağlı klorürlerin de serbest kalarak, beton boşluk suyuna karışma risklerinin olduğunu belirtmek gerekir (Baradan ve diğer., 2002).

Deniz ortamında bulunan betonarme yapılar, servis ömürleri boyunca fiziksel ve kimyasal kökenli birçok yıpratıcı etkiye aynı anda ve tekrarlı olarak maruz kalırlar. Bu fiziksel etkiler arasında, aşınma, ıslanma-kuruma ve donma çözülme etkileri sayılabilir. Deniz suyunun içerdiği zararlı iyonlar nedeniyle betonda oluşturduğu kimyasal bozulma süreçleri ise, sülfat etkisi, magnezyum iyonu etkisi ve karbonik asit etkisi şeklinde sıralanabilir. Ayrıca, klorürlerden kaynaklanan donatı korozyonu, deniz ortamındaki betonarme yapıların servis ömürlerini belirleyen en önemli kalıcılık problemi olarak kabul edilir. Yapının bu etkilerden hangilerine maruz

kalacağını ise büyük ölçüde deniz seviyesine göre konumu belirler. Ancak, en şiddetli etkiye ıslanma-kuruma bölgesindeki yapı elemanlarının maruz kaldığı söylenebilir (Yazıcı ve diğer., 2003).

Deniz suyunun beton üzerindeki kimyasal etkisi çözülmüş bazı tuzları içermesinden kaynaklanmaktadır. Denizlere ve okyanuslara göre farklılıklar olsa da, tipik tuzluluk oranı % 3,5 civarındadır. Buharlaşmanın yüksek olduğu sıcak iklimlerde tuzluluk oranı artmaktadır. Deniz suyunda önemli miktarlarda bulunabilen tuzlar, sodyum klorür (NaCl), magnezyum klorür (MgCl), magnezyum sülfat (MgSO₄), kalsiyum sülfat (CaSO₄), potasyum klorür (KCl) ve potasyum sülfat (K₂SO₄) olarak sıralanabilir. Deniz suyunun tipik iyon konsantrasyonuna bakıldığında 11000 mg/l Na⁺, 20000 mg/l Cl⁻, 1400 mg/l Mg⁺², 2700 mg/l SO₄⁻², 500 mg/l kalsiyum, 400 mg/l potasyum içerdiği görülmektedir. Çimento hidrasyon ürünlerine kimyasal saldırı açısından bakıldığında ise deniz suyunun yüksek miktarda sülfat ve magnezyum içerdiği söylenebilir. Ayrıca, deniz suyunun önemli miktarda çözülmüş oksijen ve karbondioksit içerebildiğini ve bu gazların yoğunluğunun lokal şartlara göre çok değişken olduğunu ilave etmek gerekir (Yazıcı ve diğer., 2003).

Hızlı klor geçirimsizliği deneyi 28 günlük disk numuneler üzerinde “ASTM C 1202-97 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” standardı esaslarına göre uygulanmıştır. Buna göre, suya doymuş hale getirilen numune test cihazının hücreleri arasına yerleştirilip, numune yan yüzeyleri geçirimsiz bir malzeme ile kaplanır. Hücrelerin birinde %3 NaCl çözeltisi ve metal elektrot, diğerinde ise 0,3 N NaOH çözeltisi ve metal elektrot bulunmaktadır. Deney düzeneği Şekil 5.2’ de görülmektedir.



Şekil 5.2 Hızlandırılmış klor geçirimsizliği deneyi düzeneği.

Altı saat süre ile iki hücre arasında 60 V potansiyel uygulanır. Test süresi boyunca beton diskten geçen elektrik yükü coulomb biriminde yarım saatte bir kümülatif olarak kaydedilir.

Şengül ve diğer. (2001) yaptıkları çalışmada, ince öğüttükleri yüksek fırın cürufunu %70 oranına kadar %10' luk adımlarla arttırarak çimentoya ikame etmişlerdir. Bu çalışma neticesinde cüruf oranının artması, klor geçirimsizliğinin azalmasını sağlamıştır.

Yığiter (2008) doktora tezinde hızlandırılmış klor geçirimsizliği deneyini uygulamıştır. Buna göre, normal dayanımlı betonlarda, kontrol betonlarına göre %40 oranında uçucu kül kullanımı hızlı klor geçirimsizliği değerlerini %57, %10 oranında silis dumanı kullanımı ise hızlı klor geçirimsizliği değerlerini %81 oranında azaltmıştır. Yüksek dayanımlı betonlarda kontrol betonlarına göre, %40 oranında uçucu kül kullanımı hızlı klor geçirimsizliği değerlerini %57, %10 oranında silis dumanı kullanımı ise hızlı klor geçirimsizliği değerlerini %78 oranında azaltmıştır. Hem normal dayanımlı betonlarda hem de yüksek dayanımlı betonlarda %40

oranında uçucu kül kullanımı klor geçirimsizliğini bir üst performans sınıfına taşımıştır. Karışımlarda %10 oranında silis dumanı kullanılması ile iki üst sınıfa geçilmiştir. Mineral katkıli betonlarda azalan klor geçirimsizliği, azalan boşluk yapısı ile sağlanan düşük geçirimsizlik ve yüksek elektriksel direnç özelliklerinin sonucudur (Yiğiter, 2008).

Erten (2009) tez çalışması kapsamında yaptığı deneylerde aşağıdaki sonuçları elde etmiştir:

- Klor geçirimsizlik deneyinden elde edilen sonuçlara göre, CEM III/A 42,5 ve CEM II/B-M 32,5 çimentolarıyla üretilen örneklerin tüm koşullarda diğer örnek tiplerinden daha düşük coulomb değerine ve daha yüksek klor geçirimsizlik direncine sahip oldukları görülmektedir. Bu çimento tiplerinin incelik ve mineral katkı oranlarının yüksek oluşuyla artan hidrasyon gelişimi ve puzolanik aktiviteleri sayesinde bu sonuca ulaşıldığı düşünülmektedir.

- Kirece doymuş suda hidrasyon gelişiminin yaşla doğru orantılı olması, 350. gün klor geçirimsizlik direncinin 28 gün verilerinden yüksek olmasına yardımcı olmuştur.

- Deniz suyunda bekletilen örneklerin 350. gün klor geçirimsizlik dirençlerinin 350. gün kontrol örneklerine göre azaldığı görülmüştür. Deniz suyunda yüksek coulomb değerlerine rastlanmasının sebebi, örneklerin bünyesine işlemiş klorürlerin deney sırasında oluşan klorür geçişine destek olmalarıdır. CEM I 42,5 R çimentosunun 350. günde en az klor geçirimsizlik artışı verdiği görülmüştür. Bu çimentonun C_3A miktarının fazla oluşu sayesinde Friedel Tuzu oluşturma kapasitesi artarak serbest iyonların geçişine izin verilmemiştir.

- Mineral katkıli tüm örnekler genellikle her koşulda CEM I 42,5 ile üretilenlerden daha az klor geçirimsizlik değerine sahiptir.

Poon ve diğer. (2005) yaptıkları çalışmada metakaolin ve silika dumanını

karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre %20 oranında ikame edilen metakaolin tüm yaşlarda ve her iki su/bağlayıcı oranı için de en iyi sonucu sağlamıştır. Silika dumanı da kontrol örneklerine göre olumlu sonuçlar vermiş ancak, klor geçirimsizliğini engellemede metakaolinin gösterdiği başarıyı sağlayamamıştır.

5.2 Kapiler Su Emme

Betonun durabilitesi boşluk miktarı ve yapısı ile yakından ilgilidir. Boşluk miktarı ve boşlukların birbirleri ile olan bağlantıları arttıkça çeşitli zararlı malzemelerin ve suyun beton içine girmesi ve taşınımı kolaylaşır. Bunun sonucu olarak ise beton daha kolay hasar görür. Betonun durabilitesinin artırılarak daha uzun servis ömürlerine sahip yapılar elde edilebilmesi için öncelikle betonun boşluk miktarının azaltılması gereklidir. Betonun su/çimento oranının düşürülmesiyle birlikte betondaki kılcal boşluklar azalmaktadır. Kılcal boşlukların azalması sonucu ise betonun dayanımı artar ve geçirimsizliği düşer. Uygun özelliklerdeki puzolanik malzemelerin betonda kullanımıyla da boşlukların azaltılması mümkündür. Puzolan çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat oluşturur. Bunun sonucu betonun boşluk yapısı değişir.

Betonun emebileceği su miktarı, betonun içerisindeki boşlukların toplam hacmi ile ilgilidir. Betondaki toplam boşluk hacmi ise, betonda kullanılan su/çimento oranı, agrega cinsi, kür koşulları, kür süresi, karbonatlaşma, beton elemanın boyutu gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir (Erdoğan, 2003).

Su emme kapasitesi yüksek olan betonların dayanımları daha düşük olmaktadır. Ayrıca, betonun dayanıklılığı da, betondaki su emme özelliği tarafından etkilenmektedir. Örneğin, kapiler boşluklar suya doygun durumda iken bu boşluklardaki suyun donması, betonun içerisinde büyük gerilmelerin oluşmasına yol açmaktadır. Sülfat, asit, klor ve benzeri zararlı maddeleri içeren suların beton

tarafından emilmesi, betonda hasar yaratacak kimyasal olayların başlamasına neden olmaktadır. Betonun geçirimsizliği beton içerisinden su akışını gösterdiği için, geçirimsizlik ve su emme farklı özelliklerdir. Ancak, su emme, betonun geçirimsizliğini de etkileyen önemli bir özellik durumundadır. Sertleşmiş betonun “su emme” miktarının tayini ile ilgili Türk standardı TS 3624’tür. ASTM standartları tarafından belirtilmiş bir yöntem yoktur (Erdoğan, 2003).

Sertleşmiş betonun yüzeyi ile temas eden sıvılar ve gazlar, betonun içerisine girerek akış gösterebilmektedirler. Betonun içerisindeki sıvıların akış göstermeleri değişik nedenlerden kaynaklanmaktadır. Bunlar, hava veya su basıncının yarattığı farklılıklar, nemlilik farklılıkları, betonun içerisindeki sıvıların farklı konsantrasyonlarından doğan osmosis olayıdır. “Geçirimsizlik”, sıvıların ve gazların, betonun içerisinde akış gösterebilmelerine imkân tanıyan bir özelliktir. Sıvıların ve gazların betonun içerisinde akış gösterebilmeleri, betonda yer alan boşlukların birbiriyle bağlantılı olması nedeniyle gerçekleşebilmektedir (Erdoğan, 2003).

ASTM C 1585 deney yöntemi, hidrolik çimento betonunun yalnızca bir yüzünün suyla temas halinde olması durumunda zamanla oluşan su emme gücü sonucu ağırlıkta meydana gelen artış yardımıyla su emme hızını hesaplamak için kullanılır. Beton örneğinin suyla temas halinde olan yüzeyinden su girişi kapiler emme yoluyla oluşur. Bu deney yöntemi, beton örneğinin hem yüzeyinde hem de içinde oluşan su emme hızının ölçümüne yarar. Beton örneğini 50°C’ deki etüvde 3 gün bekletmekle deneye başlanır. Etüvden çıkarılan örnek, kapalı bir kaptaki soğumaya bırakılır ve daha sonra ağırlığı ölçülür. Ölçülen ağırlık başlangıç ağırlığıdır. Suyla temas edecek yüzey hariç diğer tüm yüzeyler yalıtım malzemesiyle kaplanır. Su emme deneyi, şehir şebeke suyuyla yapılır. Deney kabına destek malzemeleri döşenerek örnek bunların üstüne yerleştirilir ve suyla temas edecek yüzeyin 1 ila 3 mm su yüksekliği içinde kalması sağlanır. Ve belirli aralıklarla örneğin emdiği su miktarı tartım sonucuyla gözlemlenir. Kapilarite katsayısını belirlemede kullanılan formül aşağıda verilmiştir.

$$M = \frac{c}{100} F \sqrt{t} \quad (6.1)$$

Yüzer (1999) yaptığı çalışmada, silika dumanını farklı oranlarda karışımına eklemiştir. Yüksek oranlarda karışıma eklenen silika dumanı harcın kılcal su geçirirmliliğini azaltmıştır. Ayrıca Yüzer çalışmasında sürenin etkisini de incelemiş ve 28. günde $3,22 \times 10^{-5}$ cm/s olan kılcal su emme katsayısı 208. günde $1,23 \times 10^{-5}$ cm/s olarak belirlenmiştir. Silis dumanı çok ince taneli olması sebebiyle, çimento hamuru-agrega arayüzü ve çimento hamuru içindeki boşlukları doldurarak, kılcal boşlukların azalmasını sağlamıştır.

Erten (2009) tez çalışmasında kılcal yolla su emme miktarlarının su/çimento oranı arttıkça arttığını gözlemlemiştir. Su/çimento oranının artması ile basınç dayanımı azalmış ancak kapilarite katsayısı artmıştır. Deniz suyunda bekletilen 0,485 ve 0,7 su/çimento oranına sahip olan örnekler 350. günde, CEM I 42,5 çimentosuyla üretilenlerden daha az su emmiştir. Bu örnek tiplerinin arasında sadece CEM II/B-M 32,5 R ile üretilenler CEM I 42,5 R içeren örneklerden daha fazla su emmiştir. Bunun sebebi, CEM II/B-M 32,5 R çimentosunun dayanım gelişiminin diğerlerinden daha az oluşudur. Deniz suyundaki tuz kristallerinin örnek gözeneklerini tıkaması sonucu örnekler kontrol harçlardan daha az su emme miktarına sahiptir. Ayrıca Deniz suyunda ise, Ca^{+} - Mg^{+} iyonlarının yer değiştirme reaksiyonu sonucu oluşan “brusit”in ve $Ca(OH)_2$ 'nin CO_2 ile reaksiyonu sonucu oluşan “aragonit”in çökelerek gözenekleri tıkamasıyla örnek içerisine su girişi azalmaktadır. Bu sebeple, deniz suyunda 350 gün kılcal yolla su emme oranları 350 günlük kontrol örneklere göre azalmıştır.

Gutiérrez ve diğer. (2005) yaptıkları çalışmada çimento harcına %15 oranında metakaolin, silika dumanı, uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Ayrıca mineral katkıların yanı sıra karışımlarda çelik, cam, polipropilen lifler de kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda lif kullanılmayan karışımlarda en düşük kapiler emme değeri %15 metakaolin kullanılan örneklerden elde edilmiştir. Metakaolin kullanılarak hazırlanan lifli örnekler içinde en düşük değerler bitkisel lif kullanılarak hazırlanan örneklerde görülmüştür.

BÖLÜM ALTI

BASINÇ DAYANIMI

Betonun tüm mekanik özellikleri arasında en önemli olanı ve değeri en büyük olanı basınç dayanımıdır. Beton gevrek bir malzemedir. Çekme dayanımının çok küçük olması nedeniyle pratikte beton, yalnızca basınca çalıştırılır.

Basınç dayanımı betonun olumlu özellikleri ile paralellik gösterir. Örneğin yüksek basınç dayanımına sahip olan bir betonun kompasitesi fazladır, serttir, geçirimsizdir, dış etkilere dayanıklılığı yüksektir ve aşınması azdır. Bu nedenle basınç dayanımından yola çıkılarak betonun kalitesini global olarak değerlendirmek mümkündür.

Basınç dayanımı deneyi diğer denetleme deneylerine oranla en kolay olanıdır. Betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımı zamanın artan bir fonksiyonudur ve dayanım artımı yıllarca sürebilir. Ancak betonarme yapılarda genel olarak 28 günlük dayanım esas alınarak emniyet gerilmeleri saptanır.

Basınç dayanımı üretimi izleyen 28. gündeki örneklerin basınç dayanımı olarak hesaplara esas alınır. Pratik yönden 2. ve 7. ve bazen 56. ve 90. gündeki değerleri de saptanabilir.

Aynı malzemelerle hazırlanmış, aynı koşullarda saklanmış betonun değişik yaşlardaki basınç dayanımlarının araştırılması değişik araştırmacılar ve kuruluşlarca incelenmiştir. Ancak bu ilişki büyük ölçüde çimento tipine bağlıdır. Örneğin, traslı çimento kullanılarak hazırlanan bir betonun 7 günlük dayanımı, 28 günlük dayanımının yaklaşık %65' i dir. Buna karşılık, yüksek dayanımlı çimento

kullanılarak aynı agregalarla aynı koşullarda üretilen bir betonun 7 günlük dayanımı 28 günlük dayanımının yaklaşık %80'i kadardır.

Beton sınıfları, betonarme veya öngerilmeli beton projelerinde öngörülen proje dayanımlarıdır. Doğal olarak bu dayanımlar güvenlik katsayılarına bölünerek emniyet gerilmeleri ile çalışılır.

Betonun yüksek basınç dayanımına sahip olabilmesi için malzeme açısından bir takım kurallara uyulması gerekir. Ancak beton bileşimi doğru ilkelere uyularak saptansa da beton dayanımı; malzeme dışında işçilik, kür gibi birçok faktörün etkisi altındadır. Beton bileşimi ve dayanımı arasındaki ilişkiyi etkileyen faktörler şöylece özetlenebilir:

6.1 Çimento ile İlgili Faktörler

Betonu oluşturan agrega tanelerini birbirine bağlayan çimento hamuru dayanımını kaybettiği zaman, betonun da dayanımı sona erer. Çimento betonun dayanımını iki şekilde etkiler. Bunlardan birincisi dozaj adı verilen çimento miktarıdır. Çimento dozajının artması ile çimento hamurunun hacmi artar. Bu şekilde beton kesitinde herhangi bir zorlama altında, çimento hamurunda oluşan gerilmeler daha küçük değerlerde kalır. Bu durum betonun daha büyük dayanımlar kazanmasına neden olur. Çimento miktarı ile dayanım arasında doğrusal bir bağıntının varlığı kabul edilir. Ancak çimento miktarının çok arttırılması rötreye neden olacağından dozajın belirli bir değeri geçmesi durumunda özellikle betonun çekme dayanımı azalmaktadır (Baradan, 2004).

Çimento dozajı agreganın granülometri bileşimi ile yakından ilgilidir. Genel olarak agrega karışımında ince taneler miktarı fazla ise, kaplanması gereken özgül yüzey fazla olacağından çimento dozajı büyük olmalıdır. Çimento miktarının en az

değeri, bağlayıcı madde hamurunun agreganın etrafındaki tüm boşlukları doldurmasına yetecek şekilde seçilmelidir. Buna göre, agrega en büyük boyutu D büyüdükçe, D'nin büyümesine bağlı olarak dozajın en az değeri düşmektedir.

Çimento dozajı için önerilen en az değer:

$$C_{\min} = \frac{550}{\sqrt{D}} \quad (6.2)$$

formülü ile ifade edilir. D; mm cinsinden en büyük tane çapıdır. Bu bağıntıdan anlaşılacağı gibi tane çapı büyüdükçe gerekli minimum çimento dozajı azalmaktadır. Bunun nedeni, tane çapının büyümesine bağlı olarak agrega yığınının boşluğunun azalmasıdır (Baradan, 2004).

Çimentonun ikinci etkime şekli ise, çimento tipinin beton dayanımını etkilemesidir. Dayanımı yüksek olan çimentolarla üretilen betonların dayanımları yüksek çıkmaktadır. Ayrıca çimentonun hidrasyon hızlarına bağlı olarak, betonların da dayanımları zamana bağlı olarak, farklı oranlarda artar.

6.2 Yoğurma Suyu ile İlgili Faktörler

Beton üretiminde kullanılan yoğurma suyunun şu işlevleri vardır:

- a) Bağlayıcı maddenin hidrasyon adı verilen kimyasal reaksiyonunu başlatır.
- b) Kum ve iri agrega tanelerini ıslatarak, betonun işlenebilme yeteneğine sahip olmasını sağlar.

Beton dökülürken en uygun miktarda su kullanılmalıdır. Suyun en uygun değerden az veya fazla kullanılması betonun dayanımını düşürür. Suyun en uygun değerden az kullanılması, hidrasyonun gelişmesine yeterli olmayacağından ve

işlenebilirliğin azalması nedeniyle boşlukların artmasına neden olacağından sakıncalıdır. Fazlalığı ise betonda fazla boşluk bırakacağından zararlıdır.

Genellikle uygulamada beton üretilirken, betonun taşınması ve yerleştirilmesini kolaylaştırmak amacıyla, bilinçsiz bir şekilde su miktarını artırmak yönüne gidilir. Bu da çok sakıncalı bir durum yaratır. Hidratasyon için gerekli su, çimento ağırlığının %14'ü kadardır. Hidrate çimento taneleri arasında kalacak adsorplanmış jel suyu da hesaba katılırsa, gerekli su, ancak %25 değerine varmaktadır. Ancak bu değer işlenebilme gereği yüzünden betona katılan ek su nedeniyle, su/çimento oranı nadiren 0,40'ın altına düşer. Uygulamada su/çimento çoğunlukla %50-65 arasında alınır. Hidratasyon ve jel yapı için gerekli suyun üstündeki fazla su beton sertleştikten sonra buharlaşarak, beton içinde çoğunluğu kılcal olan boşlukların oluşmasına neden olur. Bu boşluklar da betonun basınç dayanımını olumsuz yönde etkiler (Baradan, 2004).

Akışkanlaştırıcı, süperakışkanlaştırıcı beton katkı maddelerinin kullanımı halinde, işlenebilirliği azaltmadan su/çimento oranını 0,25'lere kadar düşürmek olanaklıdır. Su miktarını ayarlamak, beton üretiminin en nazik, önemli ve zor problemidir.

Betonun yüksek bir basınç dayanımına sahip olabilmesi; su/çimento oranının kritik değerleri, yerleştirme araçlarının kabiliyeti, betonun kıvamı, katkı maddesi eklenmesi, D'nin değeri gibi çeşitli şartlara bağlı bulunmaktadır. D=32 mm için ve betonun yerleştirilmesinde vibratör kullanımı halinde, yüksek dayanımlı beton elde edilmesi için su/çimento oranının 0,52'den büyük olmaması gerekir. Su miktarının en uygun değeri, çimento için ağırlığının 0,23'ü kadar su, agrega için Bolomey formülüne göre granülometriye bağlı olarak hesaplanan yüzdelerle bulunabilir.

$$S = 0,23xC + \beta xU + \gamma xV \quad (6.3)$$

Burada C çimento ağırlığını, U kum ağırlığını, V ise iri agrega ağırlığını göstermektedir. β ve γ ince ve iri agreganın granülometrilere bağlı su yüzdesi katsayılarıdır. Ancak teorik yaklaşımlar dışında mühendislik önsezisi ve deneyimi büyük değer taşır. Ayrıca betonda boşluk yaratmayacak şekilde, kum miktarını azaltmak veya vibratör kullanmak gibi yöntemlerle su miktarını düşürmek olanaklıdır (Baradan, 2004).

6.3 Kompasitenin Dayanım Üzerindeki Etkisi

Kompasitenin küçük olması betondaki boşlukların fazla olması demektir. Boşluk oranının veya porozitenin büyük olması, malzemenin elastisite modülünün düşük değerler alıp, düşük dayanım değerleri göstermesine sebep olur. Ayrıca betondaki boşluklar çoğunlukla iri agrega ile çimento hamuru arasında oluşur. Bu durum çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı azaltır ve dayanımın daha da düşmesine neden olur. Ayrıca betondaki boşluklar betonun kalıcılığını da olumsuz yönde etkilemektedir.

6.4 Dış Etkiler – Kür Koşulları

Çevre koşullarının priz ve sertleşme aşamasında betona etkisi çok büyük ve önemlidir. Kür koşulları adı verilen çevre koşullarını doğru ayarlayabilmek beton kalitesinin yükselmesinde olumlu etki gösterir. Kür koşullarını, sıcaklık ve rutubet etkisi olarak düşünmek gerekir.

Sıcaklık derecesinin ve rutubet oranının yüksekliği, hidrasyonu hızlandırması nedeniyle, betonun dayanım kazanma hızını artırır.

Rutubeti yüksek tutmak, hatta ortamı doygun rutubette tutmak kaydıyla sıcaklık 60°C'nin üzerine çıkarılarak (70-90°C) dayanım kazanma hızı artırılabilir. Bu işleme, ısıl işlem, atmosfer basıncında buhar kürü, etüvleme, tünel kalıp yöntemi gibi adlar verilmektedir. Bu yöntemlerde beton çok kısa sürede (1-2 gün) istenen dayanıma ulaşır. Prefabrik beton yapı elemanlarının üretiminde de bu yöntemlerden yararlanır.

Gerekli sertleşme süreleri, sıcaklık ve zamanın etkisini birlikte belirten bir büyüklük olan "olgunluk derecesi" ile saptanır.

$$O.D. = \sum_{i=1}^n t_i(\theta_i + 10) \quad (6.4)$$

Burada θ_i betonun veya çevrenin sıcaklığı, t_i ise bu sıcaklıkta geçen süredir. Olgunluk derecesinin uygulama alanı betonun kalıp alma süresini belirlemektir.

İkinci çevre faktörü rutubettir. Bağıl nem %50'nin altına düştüğünde betondaki suyun buharlaşması söz konusu olur. Bu durumda hidrasyon için gerekli su kalmayabilir. Özellikle taze betonda hidrasyon olayının gelişimi çok hızlı olduğundan su kaybı daha da önem taşır. Buharlaşmanın fazlalığı erken (plastik) rötre olayını önemli ölçüde artırır ve çatlaklı bir yapının oluşmasına neden olur. Yetersiz hidrasyon yapmış ve çatlaklı yapıda olan betonun mekanik özellikleri de düşük olur. Bu nedenle standartlar, deney örneklerinin deney gününe kadar 20°C sıcaklıkta ve su içinde saklanmasını öngörmektedir.

6.5 Deney Koşulları – Örnek Şekil ve Boyutları

Betonların küp dayanımları 20 cm ayrıtlı örnekler, silindir dayanımları ise çapları 15 cm yükseklikleri 30 cm olan örnekler üzerinde deneyler yapılarak bulunur. TS

500 silindir örnekleri esas kabul etmektedir, ancak küpleri de geçerli saymıştır.

Örnek şekli ve boyutları ise basınç dayanımlarını önemli bir şekilde etkilemektedir. Standart küp ve standart silindir dayanımları arasındaki ilişki kurabilmek için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucu, aynı karışımdan hazırlanmış örneklerin silindir dayanımlarının, küp dayanımlarına kıyasla ortalama 0,15-0,20 daha az olduğu saptanmıştır. Ancak beton kalitesi yükseldikçe bu oranın 0,90-0,95'e yükseldiği belirlenmiştir.

Silindir örneklerin yükseklik/çap (h/d) oranının 2,0 olması gerekir. Çeşitli nedenlerle h/d oranı 2,0'den farklı örneklerin bulunan basınç dayanımlarının düzeltme katsayıları ile çarpılması gerekir.

Boyutun dayanıma etkisi, büyük örneklerde çatlak ve benzeri kusurların daha fazla olma olasılığıdır. Şeklin dayanıma etkisi ise narin örneklerin yanal şekil değiştirmesinin daha kolay olması sonucudur. İyi yapılmış bir tek eksenli basınç deneyinde beton, kuvvet yönünde gelişen düşey çatlakların açılması sonucu kırılır. Pres tablası ile örnek arasındaki sürtünme, yanal genişlemeyi engeller. Basık örneklerde bu engelleme daha fazla olduğu için dayanım daha yüksek değerdedir.

Basınç deneyinde bazı örneklerde kırılma, eğik çatlakların oluşması ile başlar. Giderek bu çatlaklar örneğin bir piramit biçiminde kırılmasına neden olur. Eksenel kuvvet etkisindeki örneklerde bu tip kırılışın nedeni, pres tablası ile örnek tabanları arasındaki sürtünmeden dolayı, yük eksenine dik yönde oluşan kuvvetlerdir. Bu sakıncayı ortadan kaldırmak amacıyla, örneklerin alt ve üst yüzeylerine başlık yapılır. Bu başlıklar genellikle kükürt ve parafin karışımından oluşur. Sürtünmenin az olduğu bir örnekte kırılma, yük eksenine paralel çatlaklarla oluşmaktadır.

Pres tablası ile örnek yüzünde sürtünmeden dolayı oluşan kuvvetlerin etkisi, yükün uygulandığı yüzeyden uzaklaştıkça azalmaktadır. Bunun doğal sonucu olarak, örnek boyunun kesit boyutuna oranı büyüdükçe sürtünme etkisi azalmaktadır.

Beton zamana bağlı şekil değişimi gösterdiğinden, yükleme hızı önemlidir. Yapılan deneyler, yavaş yüklenen örneklerin dayanımlarının, hızlı yüklenen örneklere kıyasla daha düşük olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, yükleme hızında bir standartlaşmaya gidilmiştir. Türk şartnamelerinde bu hız yaklaşık olarak saniyede 1,5-3,5 kgf/cm² olarak verilmektedir.

Şantiyede kullanılan betonun basınç dayanımı ile laboratuarda üretilen örneklerin basınç dayanımları eşit değildir. Yapıda çevre, kür ve sıkıştırma koşulları farklıdır. Standart örnekler üzerinde yapılan deneyler daha çok beton karışımının, üretiminin kalite kontrolüdür. Kuşkulu durumların ortaya çıkması halinde yapılardaki beton kalitesinin yerinde incelenmesi yoluna gidilir. Uygulamada yapılardaki betonların kalite kontrolü de tahribatlı veya tahribatsız olmak üzere iki yolla gerçekleştirilir.

En güvenilir deney yöntemi, yapı elemanlarından karot adı verilen örnekler alıp, bunları tek eksenli basınç deneyine tabi tutmaktır. En sağlıklı sonuçları veren bu deney yöntemine, yapı elemanlarında tahribat yaptığından ve yapımı zahmetli olduğundan ancak zorunluluk hallerinde başvurulur.

Günümüzde en çok kullanılan, tahribatsız ve çabuk sonuçlar vermesi nedeniyle tercih edilen deney yöntemi ise beton çekici deneyidir. Ernst Schmidt tarafından bulunan bu aygıt betonun yüzey sertliği değerinden yararlanarak, basınç dayanımı değerini verirler. Aslında betonun sertlik ve basınç dayanımı arasında belirgin bir bağıntı olmamasına rağmen, deneysel verilere bağlı olarak ampirik ilişkiler kurulabilir. Deney sonuçlarının güvenilirlik derecesi, aletin kalibrasyonu, deney

yerinin seçimi, beton yüzeyi ile iç bünyesinin farklılığı, betonun yaşı gibi bir takım faktörlere bağlıdır. Ancak bunlar sertleşmiş betonu tahrip etmeden, basınç dayanımı ve üniformite hakkında iyi bir fikir verdiklerinden çok yararlı olabilmektedir. Ayrıca ultrases yöntemiyle de betonun basınç dayanımı ve üniformitesi hakkında bir fikir edinilebilir. Ancak bu deneyler beton basınç dayanımını kesin olarak değerlendirmede kullanılamaz.

Curcio ve diğerleri (1998) yaptıkları deneysel çalışmada çimento yerine %15 oranında metakaolin ikame etmişlerdir. Dört farklı özellikteki metakaolini hem kendi aralarında hem de silika dumanı katkılı karışımla kıyaslamışlardır. Bu kıyaslama neticesinde metakaolin kullanılarak hazırlanan harçlar benzer özellikler göstermişler ve erken yaşlarda yüksek dayanımlara ulaşmışlardır. Ancak 90. gün yapılan basınç dayanımı deneyi sonucunda silika dumanı kullanılarak hazırlanan harçlar metakaolinli harçların basınç dayanımlarını yakalamış ve hatta geçmişlerdir.

Khatib (2007) yaptığı çalışmada farklı oranlarda metakaolin kullanarak hazırladığı harçların yarısını suda, yarısını havada kür etmiştir. Buna göre suda kür edilen örnekler arasında yüksek metakaolin ikame edilmiş olanlar erken yaşlarda yüksek dayanım sağlarken, ileri yaşlarda dayanım değerleri birbirlerine yaklaşmıştır. Havada kür edilen örneklerde de benzer bir davranış belirlenirken, örneklerin dayanımlarının suda kür edilen örnekler kadar yüksek olmadığı gözlenmiştir.

BÖLÜM YEDİ

DENEYSEL ÇALIŞMA

7.1 Deneysel Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, CEM I 42,5R tipi çimento ve farklı metakaolin katkı oranlarıyla hazırlanan harç örneklerinin bazı mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesidir.

Bu çalışmada iki grup harç karışımı oluşturulmuş, buna göre ilk grup harç karışımlarında su/bağlayıcı oranı su ihtiyacına göre serbest bırakılarak, harcın sarsma tablasında yayılma değeri 110-120 mm arasında sabit tutulmuştur. İkinci grupta ise süperakışkanlaştırıcı kullanılarak su/çimento oranı 0,5 değerinde sabit tutulmuştur.

Her iki grupta da metakaolin sırasıyla çimentonun kütlece % 2,5, 5,0, 7,5, 10,0, 12,5, 15,0 ve 20,0' si oranlarında ikame edilmiştir. Hazırlanan örnekler 20⁰C sıcaklıktaki kirece doygun suda kür edilmiştir. Hazırlanan örnekler üzerinde eğilme deneyi, eğilme sonrası basınç deneyi, gecikmiş etrenjit oluşumu, klor geçirimsiliği, alkali silika reaktivitesi ve kapiler su emme deneyleri yapılmıştır. Her deney için hazırlanan örneklerin karışım oranları ve örnek sayıları Tablo 7.1 ve 7.2' de verilmiştir.

Tablo 7.1 I. grup harç karışımlarının karışım oranları ve dökülen örnek sayıları.

Karışım Adı	Metakaolin Oranı %	Su/bağlayıcı	Örnek Sayısı				
			Dayanım	Gecikmiş Etrenjit Oluşumu	Alkali Silika Reaksiyonu	Klor Geçirimsizliği	Kapiler Su Emme
MK-1	0,0	0,50	12	4	2	2	3
MK-2	2,5	0,52	12	4	2	2	3
MK-3	5,0	0,54	12	4	2	2	3
MK-4	7,5	0,54	12	4	2	2	3
MK-5	10,0	0,57	12	4	2	2	3
MK-6	12,5	0,58	12	4	2	2	3
MK-7	15,0	0,60	12	4	2	2	3
MK-8	20,0	0,62	12	4	2	2	3
TOPLAM: 184			96	32	16	16	24

Tablo 7.2 II. grup harç karışımlarının karışım oranları ve dökülen örnek sayıları.

Karışım Adı	Metakaolin oranı %	Su/bağlayıcı	Örnek Sayısı				
			Dayanım	Gecikmiş Etrenjit Oluşumu	Alkali Silika Reaktivitesi	Klor Geçirimsizliği	Kapiler Su Emme
MK-1K	0,0	0,50	12	4	2	2	3
MK-2K	2,5	0,50	12	4	2	2	3
MK-3K	5,0	0,50	12	4	2	2	3
MK-4K	7,5	0,50	12	4	2	2	3
MK-5K	10,0	0,50	12	4	2	2	3
MK-6K	12,5	0,50	12	4	2	2	3
MK-7K	15,0	0,50	12	4	2	2	3
MK-8K	20,0	0,50	12	4	2	2	3
TOPLAM: 184			96	32	16	16	24

7.2 Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin karakteristik özellikleri aşağıda verilmektedir.

7.2.1 Çimento

Portland çimentosu (CEM I 42.5R) Batı Anadolu Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Bu çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 7.3 ve 7.4' de verilmiştir. Kullanılan çimentonun klinker analizi Tablo 7.5' te verilmiştir.

Tablo 7.3 CEM I 42,5R çimentosunun kimyasal özellikleri.

Bileşen	İçerik (%)
SiO ₂	19,90
Al ₂ O ₃	5,91
Fe ₂ O ₃	2,10
CaO	62,92
MgO	1,25
SO ₃	3,26
K.K.	3,94
Na ₂ O	0,38
K ₂ O	0,90
Alkali İçeriği	0,97
Cl	0,0112

Tablo 7.4 CEM I 42,5R çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri.

		Değerler	Standart Değerleri
			Türk Standart No: TS EN 197-1
Spesifik Yüzey (cm ² /gr)		3395	Min. 2800
Priz Başlama Süresi (dak)		160	Min. 60
Priz Bitiş Süresi (dak)		220	-
Hacim Genleşmesi (mm)		1	Max 10
Basınç Dayanımı (N/mm ²)	2 Günlük Dayanım	24,3	Min 20,00
	28 Günlük Dayanım	46,7	Min 42,5 Max 62,5

Tablo. 7.5 CEM I 42,5 R çimentosunun klinker analizi.

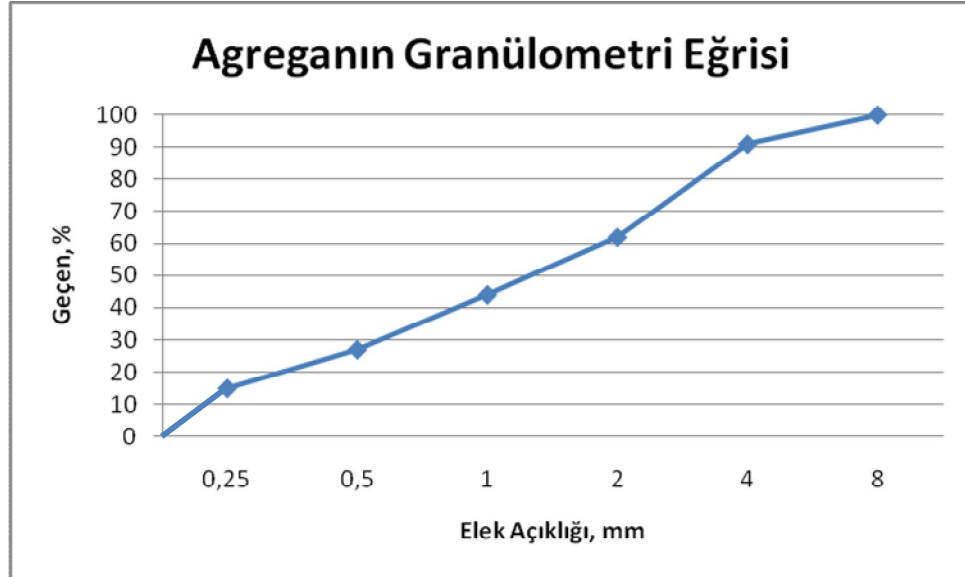
Klinker Anabilesenleri	Değer (%)
C ₃ S	52,9
C ₂ S	13,6
C ₃ A	12,1
C ₄ AF	6,4

7.2.2 Doğal Kum

80⁰C ‘de etüvde kurutulan doğal kum, 4 mm elekten elenerek kullanılmıştır. Doğal kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri Tablo 7.7’ de verilmiştir. Kullanılan agreganın granülometri eğrisi Şekil 7.1 ‘ de verilmiştir.

Tablo 7.6 Kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri.

Elek Açıklığı	Kümülatif Geçen (%)	Fiziksel Özellikleri	
8	100	Kuru Yüzey Doygun Özgül Ağırlık	2,57
4	91		
2	62		
1	44	Su Emme (%)	2,3
0,5	27		
0,25	15		



Şekil 7.1 Kullanılan agreganın (doğal kum) granülometri eğrisi.

7.2.3 Su

Hazırlanan karışımlarda şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Kullanılan suyun kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri Tablo 7.7' de verilmiştir.

Tablo 7.7 Şehir şebeke suyunun kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri.

pH	7,6
İletkenlik	400 µs/cm
Kalsiyum (Ca ⁺)	56,11 mg/l
Magnezyum (Mg ⁺²)	19,45 mg/l
Klorür (Cl ⁻)	50 mg/l
Tuzluluk	<0,1
Toplam Sertlik	22F.S ⁰ =220 mg/l CaCO ₃

7.2.4 Metakaolin

Tez kapsamında kullanılan metakaolin Powerpozz firmasından temin edilmiştir. MK' nın üretici firma tarafından belirtilen fiziksel, kimyasal özellikleri ve laboratuvar deneyi ile saptanan puzolanik aktivite indeksi değeri Tablo 7.8' de verilmiştir.

Tablo 7.8 Metakaolinin özellikleri.

Kimyasal Özellikler	Metakaolin, %
CaO	0,1
SiO ₂	52-54
Al ₂ O ₃	42-44
Fe ₂ O ₃	<1,0-1,4
MgO	<0,1
Na ₂ O	<0,05
K ₂ O	<0,4
SO ₃	<0,1
Cl ⁻	-
Serbest CaO	-
Özgül Ağırlık	2,589
Puzolanik Aktivite	7. gün 123,5
İndeksi, %	28. gün 141,4

MK'in tane boyut dağılımının incelenmesi amacıyla lazer difraksiyon yöntemi kullanılmıştır. MK taneciklerinin %10'u $2\mu\text{m}$ ' nin altında, %50'si $4.5\mu\text{m}$ ' nin altında ve %90' ı ise $25\mu\text{m}$ ' nin altındadır.

7.2.5 Süperakışkanlaştırıcı

Tez kapsamında kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı Sika firmasından temin edilen Sikament FFN isimli üründür. Melamin sülfonat polimeri esaslı sıvı katkının bazı teknik özellikleri Tablo 7.9' da verilmektedir.

Tablo 7.9 Sikament FFN süperakışkanlaştırıcı sıvı katkının bazı teknik özellikleri.

Teknik Özellik	Değer
Yoğunluk	1,22±0,02 kg/l.
pH	7 – 11
Donma Noktası	-10 ⁰ C
Viskozite	38 cP, +20°C'de
Toplam Klorür İyonu İçeriği	Max. % 0,1
Alkali Miktarı (%Na ₂ O eşdeğeri olarak)	Max. % 7

7.3 Karışımların Hazırlanması ve Numunelerin Kürü

Üretilen harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları Tablo 7.10 ve 7.11' de verilmiştir.

Tablo 7.10 Hazırlanan I. grup karışımların 1m³'ünde kullanılan malzeme miktarları, kg.

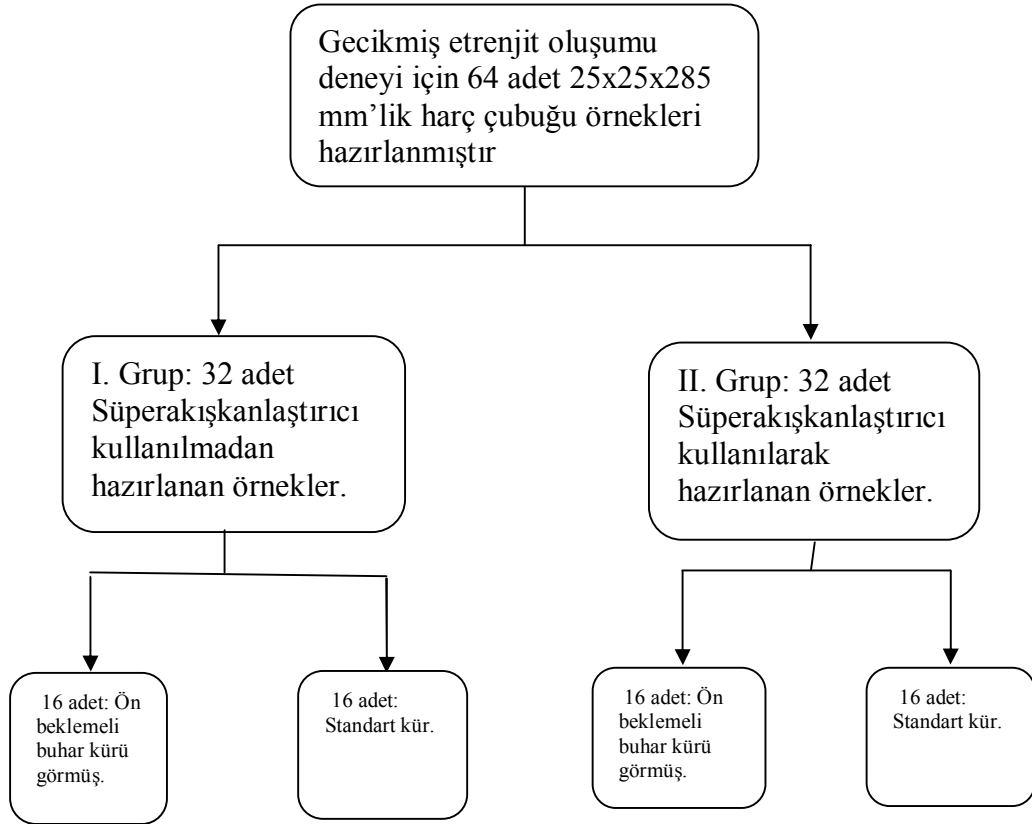
Karışım Adı	Kum	Çimento	MK	Su
MK-1	1508	503	0	251
MK-2	1507	490	12	251
MK-3	1506	476	25	253
MK-4	1472	454	37	267
MK-5	1447	434	48	279
MK-6	1446	422	60	279
MK-7	1430	405	72	286
MK-8	1413	377	94	293

Tablo 7.11 Hazırlanan II. grup karışımların 1m³'ünde kullanılan malzeme miktarları, kg.

Karışım Adı	Kum	Çimento	MK	Su	Süperakışkanlaştırıcı
MK-1	1508	503	0	251	0
MK-2	1505	489	13	251	2,2
MK-3	1503	476	25	250	2,8
MK-4	1501	463	38	250	2,8
MK-5	1500	450	50	250	3,3
MK-6	1498	437	62	250	3,3
MK-7	1496	424	75	250	3,8
MK-8	1492	402	100	293	5,5

7.3.1 Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (GEO)

Gecikmiş etrenjit oluşumunu belirlemek için hazırlanan örneklerin adedi ve boyutları Şekil 7.2' de verilmiştir.



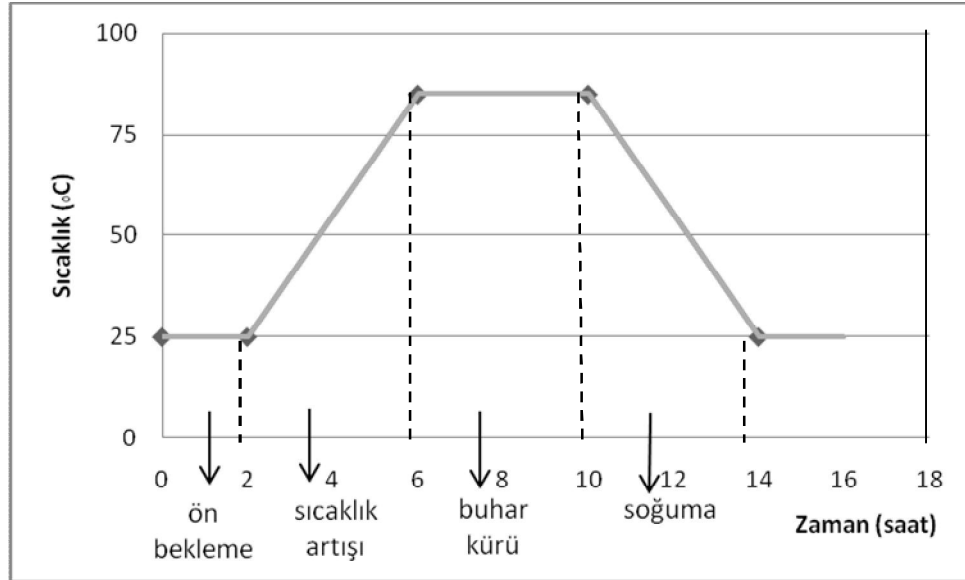
Şekil 7.2 GEO deneyinde kullanılan örneklerin adedi ve boyutları.

25x25x285 mm boyutlarındaki harç çubuğu örnekleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Harç çubuğu örnekleri ASTM C305 ve ASTM C109 standartlarına uygun olarak karıştırılmış ve sıkıştırılmıştır. Her bir karışım Hobart mikserde hazırlanmıştır. Mikser haznesine kum, çimento ve metakaolin konulmuş ve 30 sn karıştırılmıştır. İhtiyaç duyulan su hesaplanarak karışıma ilave edilmiştir. II. Deney grubu için ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı miktarı da belirlenerek karışıma katılmış ve karışım 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Mikser durdurularak kabın kenarında ve dibinde kuru malzeme kalmamasını sağlamak için kaşık ile karıştırılmış ve 30 sn daha mikser çalıştırılmıştır.

Tüm örnekler üzerinde ASTM C230 standardına uygun olarak sarsma tablası deneyi yapılmış ve harçların işlenebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı kullanmadan hazırlanan I. Grup ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan II. Grupta harçların sarsma tablası yayılma değerleri 110-120 mm arasında tutularak su ihtiyacı belirlenmiştir.

Hazırlanan karışımlar kalıplara iki kademedede doldurulmuş ve tokmaklanmıştır. Daha sonra sarsma tablasında titreşim etkisine tabi tutularak harcın sıkıştırılması sağlanmıştır. Deneysel çalışma sırasında Duggan yöntemi seçilmiştir. Buhar kürüne tabi tutulacak olan harç çubukları 2 saat bekletilmiş ve ardından kalıpları alınmadan buhar kürüne sokulmuştur.

Buhar kürü sırasında, kür sıcaklığı 20°C /saat hızla arttırılmıştır. Sıcaklığın 85°C 'ye ulaşmasının ardından örneklere, 4 saat boyunca bu sıcaklıkta kür uygulanmıştır. Kürün ardından örnekler 20°C /saat hızla soğumaya bırakılmış ve ertesi gün kalıplardan alınmıştır. Buhar kürü uygulanmayan örnekler oda sıcaklığında 24 saat süreyle bekletilmiş ve hiçbir işlem uygulanmamıştır. Buhar kürü uygulaması Şekil 7.3' de şematik olarak anlatılmıştır.

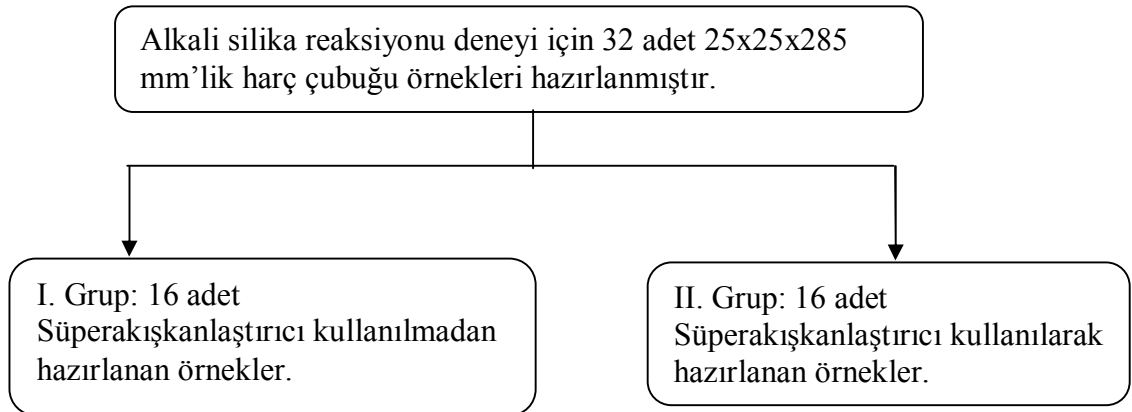


Şekil 7.3 Buhar kürünün şematik olarak gösterimi.

Kalıpları alınan örneklerin ilk boy ölçümleri yapılmıştır. 3 gün saf suda bekletilen örneklerin boy ölçümleri yapıldıktan sonra, sırasıyla 1 gün 85⁰C etüvde kurutulup ertesi gün 21⁰C suya yerleştirilmiştir. Bu şekilde 3 devir yapıldıktan sonra 3 gün daha 85⁰C etüvde bekletilen örneklerin boy ölçümleri yapılmış ve örnekler tekrar suya konularak haftalık ölçümler alınmaya devam edilmiştir. Elde edilen ölçüm değerleri 8. bölümde yer almaktadır.

7.3.2 Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)

Şekil 7.4 ' te alkali silika reaksiyonu deneyi için hazırlanan örneklerin adedi ve boyutları verilmiştir.



Şekil 7.4 ASR deneyi için hazırlanan örneklerin adedi ve boyutları.

25x25x285 mm boyutlarındaki harç çubuğu örnekleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Harç çubuğu örnekleri ASTM C305 ve ASTM C109 standartlarına uygun olarak karıştırılmış ve sıkıştırılmıştır. Her bir karışım Hobart mikserde hazırlanmıştır. Mikser haznesine kum, çimento ve metakaolin konulmuş ve 30 sn karıştırılmış ve karışıma su ilave edilmiştir. II. Deney grubu için ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı miktarı da belirlenerek karışıma katılmış ve karışım 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Mikser durdurularak kabın kenarında ve dibinde kuru malzeme kalmamasını sağlamak için kaşık ile karıştırılmış ve 30 sn daha mikser çalıştırılmıştır.

Tüm örnekler ASTM C230 standardına uygun olarak uygun olarak sarsma tablası deneyi yapılmış ve harçların işlenebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı kullanmadan hazırlanan I. Grup ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan II. Grupta harçların sarsma tablası yayılma değerleri 110-120 mm arasında tutularak su ihtiyacı belirlenmiştir.

Hazırlanan karışımlar kalıplara iki kademe dolurulmuş ve tokmaklanmıştır. Daha sonra sarsma tablasında titreşim etkisine tabi tutularak harcın sıkıştırılması sağlanmıştır. Örnekler 24±2 saat bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılmış ve ilk boy ölçümleri yapılmıştır (L_i). 24±2 saat 80°C saf suda bekletilen örneklerin tekrar boy ölçümü yapılmıştır (L_0). Bu aşamadan sonra örnekler, 80°C sıcaklıktaki 1M NaOH çözeltisi içinde 14 gün bekletilmiştir. Belirli aralıklarla, genellikle en az 3 ara ölçüm yapılmıştır. 14 gün sonunda yapılan son ölçüm (L_S) alınarak aşağıdaki denklemde yerine konarak genleşme miktarı % cinsinden bulunmuştur.

$$\text{Genleşme} = \frac{L_S - L_i}{L_i} \times 100 \quad (7.1)$$

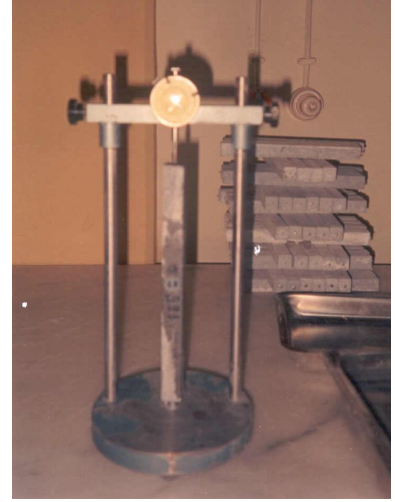
Deney sonuçlarını değerlendirmede hızlandırılmış metod olarak bilinen Kanada (CSA A23.2-25A) standardı kullanılmıştır. Buna göre, 14 gün sonunda genleşme değeri %0,15'i geçmemelidir.



Şekil 7.5. ASR deneyi için kullanılan harç çubuğu kalıpları.

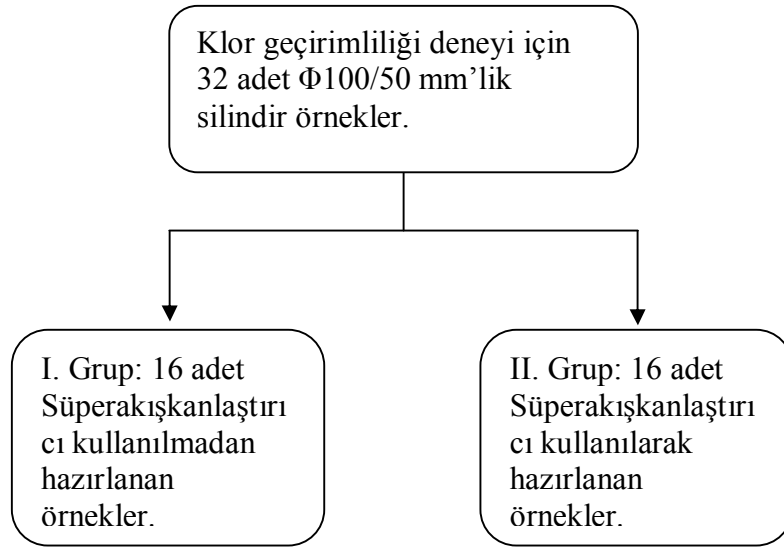


Şekil 7.6 ASR harç çubuğu örneklerinin 80°C sıcaklıkta NaOH çözeltisi içinde kür edilmesi ve boy değişimlerinin ölçülmesi.



7.3.3 Klor Geçirimsizliği

Klor geçirimsizliği deneyi için hazırlanan örneklerin sayıları ve boyutları Şekil 7.7' de verilmiştir.



Şekil 7.7. Klor geçirimsizliği deneyi için hazırlanan örneklerin adedi ve boyutları.

Φ100/50 mm silindirik örnekler TS EN 196-1 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Her bir karışım Hobart mikserde hazırlanmıştır. Mikser haznesine kum, çimento ve metakaolin konulmuş ve 30 sn karıştırılmıştır. İhtiyaç duyulan su hesaplanarak karışıma ilave edilmiştir. II. Deney grubu için ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı miktarı da belirlenerek karışıma katılmış ve karışım 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Mikser durdurularak kabın kenarında ve dibinde kuru malzeme kalmamasını sağlamak için kaşık ile karıştırılmış ve 30 sn daha mikser çalıştırılmıştır.

Tüm örnekler ASTM C230 standardına uygun olarak uygun olarak sarsma tablası deneyi yapılmış ve harçların işlenebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı kullanmadan hazırlanan I. Grup ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan II. Grupta harçların sarsma tablası yayılma değerleri 110-120 mm arasında tutularak su ihtiyacı belirlenmiştir.

Hazırlanan karışımlar kalıplara iki kademedede doldurulmuş ve tokmaklanmıştır. Daha sonra sarsma tablasında titreşim etkisine tabi tutularak harcın sıkıştırılması sağlanmıştır. Dökümden 24 ± 2 saat sonra kalıplar alınmış ve örnekler 20°C kirece doygun suda 28 gün kür edilmiştir.

Kür süresinin tamamlanmasının ardından kuru yüzey doygun haldeki örnekler Şekil 7.8’ de gösterilen deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Çözeltilerin dışarı çıkmasına engel olmak için silindir örneğin açıkta kalan yan yüzeyi silikonla kaplanmıştır (Şekil 7.9). Düzeneğin bir hücreesine 30 g/l NaCl, diğer hücreesine 12 g/l NaOH çözeltisi doldurulmuş ve silindir örneğin karşılıklı iki yüzü bu sıvıyla temas ettirilmiştir.



Şekil 7.8 Klor Geçirirliliği deneyi düzeneği.



Şekil 7.9 NaCl ve NaOH çözeltileri ve örneğin deneye hazırlanması.

Örneğin iki yüzü arasında 60 V değerinde akım geçirilmiştir. 6 saat süren deneyin ardından, örnekten geçen toplam yük coulomb cinsinden cihazın dijital ekranından

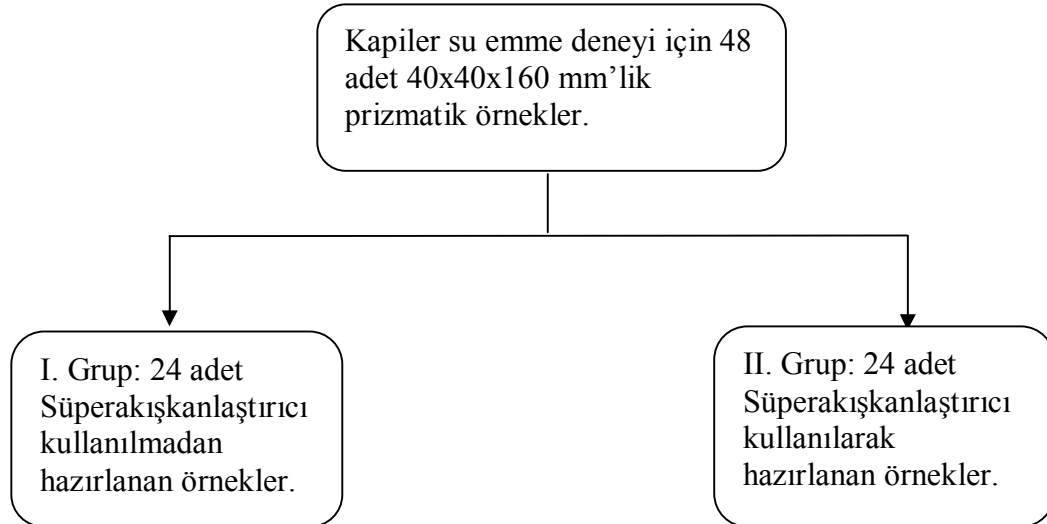
okunur. Klor iyon geçirgenliği, örnekten geçen toplam yük ile bağlantılandırılmıştır. Tablo 7.12’ de geçen yük miktarına göre betonun geçirgenlik düzeyi verilmiştir.

Tablo 7.12 Klor geçirgenliği değerlendirme kriterleri.

Geçen Elektrik Yükü (Coulomb)	Geçirgenlik
>4000	Yüksek
4000 – 2000	Orta
2000 – 1000	Düşük
1000 – 100	ok Düşük
<100	İhmal edilebilir

7.3.4 Kapiler Ve Toplam Su Emme

Kapiler su emme deneyinde kullanılan rnekerin adedi ve boyutları şekil 7.10’ da verilmiştir.



şekil 7.10 Kapiler su emme deneyinde kullanılan rnekerin adedi ve boyutları.

40x40x160 cm. prizmatik rneker ASTM C 348 standartlarına uygun olarak karıştırılmış ve sıkıştırılmıştır. Her bir karışım Hobart mikserde hazırlanmıştır.

Mikser haznesine kum, çimento ve metakaolin konulmuş ve 30 sn karıştırılmıştır. İhtiyaç duyulan su hesaplanarak karışıma ilave edilmiştir. II. Deney grubu için ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı miktarı da belirlenerek karışıma katılmış ve karışım 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Mikser durdurularak kabın kenarında ve dibinde kuru malzeme kalmamasını sağlamak için kaşık ile karıştırılmış ve 30 sn daha mikser çalıştırılmıştır.

Tüm örnekler ASTM C230 standardına uygun olarak uygun olarak sarsma tablası deneyi yapılmış ve harçların işlenebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı kullanmadan hazırlanan I. Grup ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan II. Grupta harçların sarsma tablası yayılma değerleri 110-120 mm arasında tutularak su ihtiyacı belirlenmiştir.

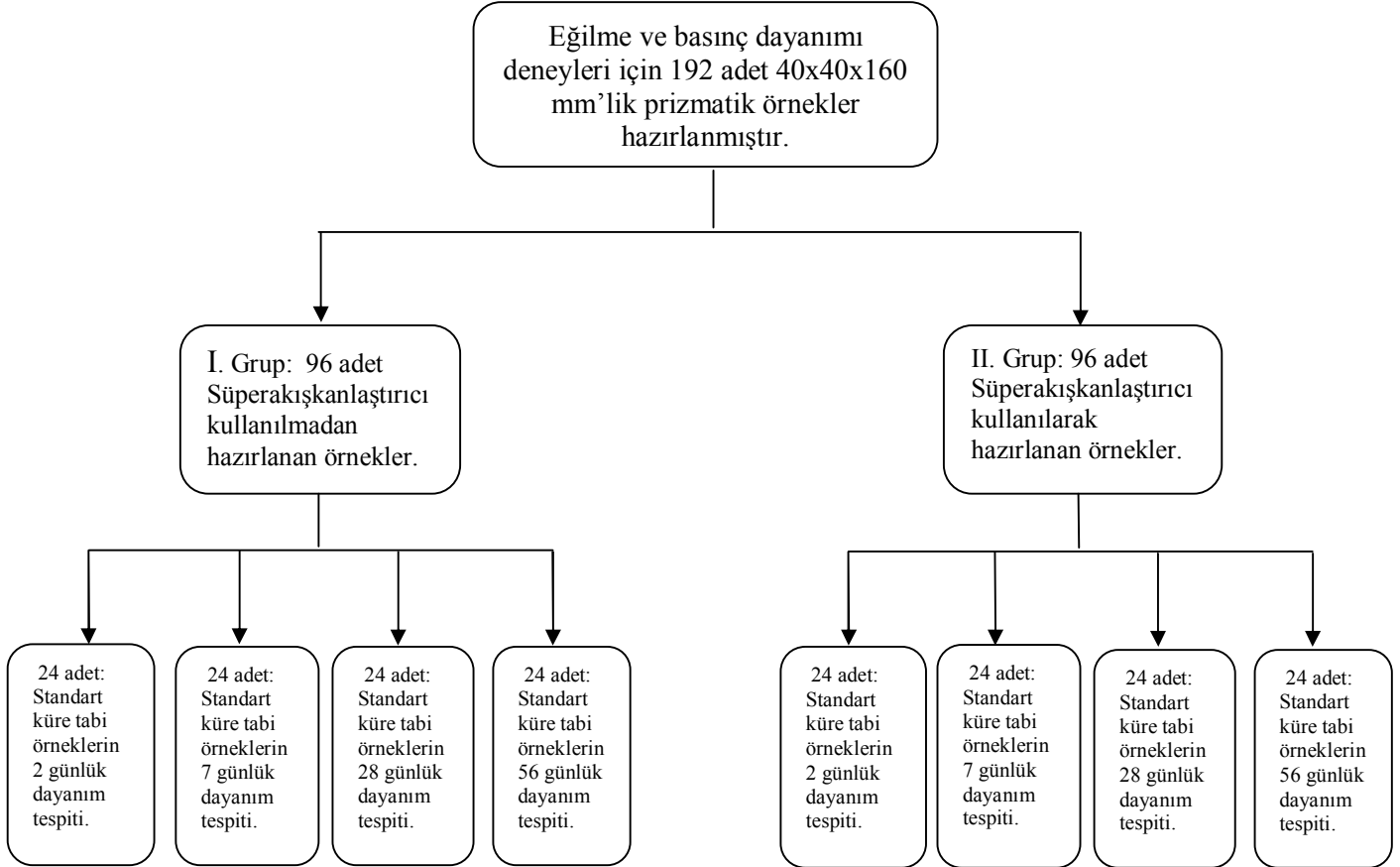
Hazırlanan karışımlar kalıplara iki kademedede doldurulmuş ve tokmaklanmıştır. Daha sonra sarsma tablasında titreşim etkisine tabi tutularak harcın sıkıştırılması sağlanmıştır. Kalıplara yerleştirilen örnekler 24 ± 2 saat bekletilmiş ve daha sonra kalıpları alınarak 28 gün boyunca 20°C deki kirece doymun suda kür edilmiştir. Kürün ardından örnekler 100°C etüvde 24 saat süreyle kurutulmuştur. Kurutma işleminin ardından örnekler tartılmış ve alt yüzeyleri suyla 1-3 mm. temas edecek şekilde deney kabına yerleştirilmiş ve ağırlıkları belirli aralıklarla Şekil 7.11' de gösterildiği gibi ölçülmüştür.



Şekil 7.11 Su emme deneyine bırakılan örneklerin tartılması.

7.3.5 Eğilme ve Basınç Dayanımı

Şekil 7.12’ de eğilme ve basınç dayanımı deneyleri için kullanılan örneklerin adedi ve boyutları verilmiştir.



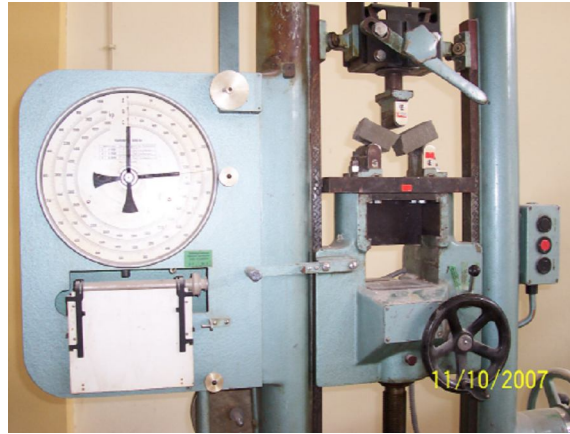
Şekil 7.12 Eğilme ve basınç dayanımı deneylerinde kullanılan örneklerin adedi ve boyutları.

40x40x160 cm. prizmatik örnekler ASTM C 348 standartlarına uygun olarak karıştırılmış ve sıkıştırılmıştır. Her bir karışım Hobart mikserde hazırlanmıştır. Mikser haznesine kum, çimento ve metakaolin konulmuş ve 30 sn karıştırılmıştır. İhtiyaç duyulan su hesaplanarak karışıma ilave edilmiştir. II. Deney grubu için ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı miktarı da belirlenerek karışıma katılmış ve karışım 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Mikser durdurularak kabın kenarında ve dibinde kuru malzeme kalmamasını sağlamak için kaşık ile karıştırılmış ve 30 sn daha mikser çalıştırılmıştır.

Tüm örnekler ASTM C230 standardına uygun olarak sarsma tablası deneyi yapılmış ve harçların işlenebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı kullanmadan hazırlanan I. Grup ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan II. Grupta harçların sarsma tablası yayılma değerleri 110-120 mm arasında tutularak su ihtiyacı belirlenmiştir.

Hazırlanan karışımlar kalıplara iki kademedede doldurulmuş ve tokmaklanmıştır. Daha sonra sarsma tablasında titreşim etkisine tabi tutularak harcın sıkıştırılması sağlanmıştır. Kalıplara yerleştirilen örnekler 24 saat bekletilerek ön dayanım kazanması sağlanmıştır.

Örnekler kalıplardan çıkarıldıktan sonra 20⁰C’de kirece doygun suda 2, 7, 18 ve 56 gün boyunca kür edilmiştir. Daha sonra kür edilmiş numuneler ASTM C 348 standardına uygun olarak Şekil 7.13’ deki makinede eğilme yüküne tabi tutulmuştur. 3 nokta eğilme deneyi 12 cm açıklık değerinde uygulanmıştır. Yük örneğin tek noktasından geçmesine kadar uygulanır. Kırılma sırasında makinenin A göstergesinden okunan yük aşağıdaki formülde yerine konularak eğilme dayanımı hesaplanmıştır.



Şekil 7.13 Eğilmede çekme deneyi için kullanılan pres.

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{PxL}{4}}{\frac{bxh^2}{6}} \quad (7.2)$$

Formülde yer alan;

σ : Eğilme dayanımı (kgf/cm^2), M: Max. moment (kgf. cm)

W: Mukavemet momenti (cm^3), P: Kırılma yükü (kgf), b: örnek genişliği (cm),

h: Örnek yüksekliği (cm) ifade etmektedir.

Eğilme deneyi ile iki parçaya ayrılan numunenin her bir parçası, ASTM C 349 standardına uygun olarak, tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 7.14’de gösterilen basınç presi 240 kgf/s yükleme hızına ayarlanmıştır. Kullanılan pres dijital olduğundan dayanım değeri, ekrandan doğrudan okunmaktadır.



Şekil 7.14 Basınç presi.

BÖLÜM SEKİZ

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

8.1 Deneysel Çalışmaların Sonuçları

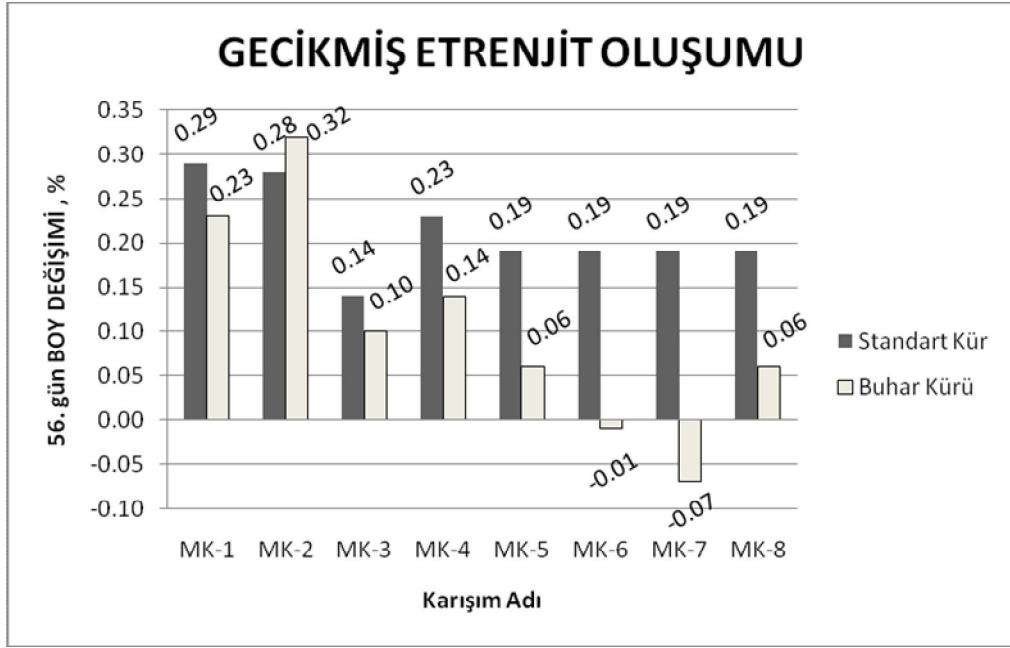
8.1.1 Gecikmiş Etrenjit Oluşumu Deneyi Sonuçları

Tablo 8.1’ de gecikmiş etrenjit oluşumu deneyinde kullanılan, süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan numunelerin 56 gün ve 21 ay sonra oluşan boy değişimi değerleri verilmiştir. Örnekler buhar kürü çevirimlerinin ardından ilk 8 ay kirece doygun suda bekletilmiş, 11 ay havada kür edilmiş ve 2 ay daha suda bekletilmiştir. Gecikmiş etrenjit oluşumu deneyinde kullanılan Duggan yönteminde harç örnekleri için boy değişimi ile ilgili bir sınır değeri belirtilmemiştir.

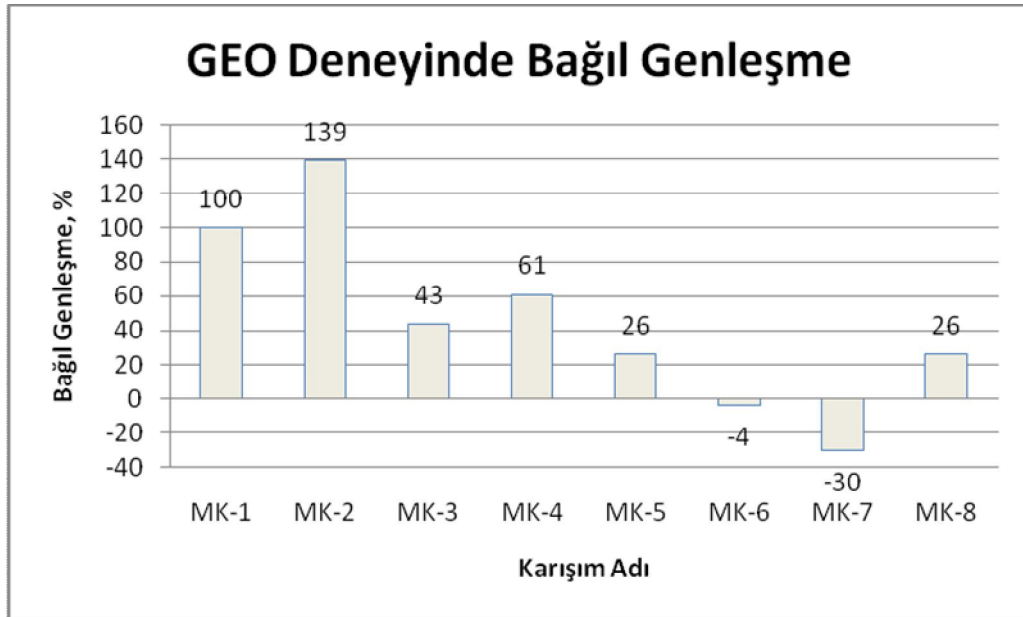
Tablo 8.1 GEO deneyinde kullanılan I. grup karışım numunelerinin boy değişimi.

Karışım Adı	Karışım Oranları, %	Boy Değişimi, %			
		56. gün		21 ay sonra	
		Standart Kür	Buhar Kürü	Standart Kür	Buhar kürü
MK-1	0,0	0,29	0,23	2,01	-0,14
MK-2	2,5	0,28	0,32	-0,18	-0,10
MK-3	5,0	0,14	0,10	1,86	-0,27
MK-4	7,5	0,23	0,14	-0,21	0,13
MK-5	10,0	0,19	0,06	-2,00	-0,20
MK-6	12,5	0,19	-0,01	-0,24	-0,45
MK-7	15,0	0,19	-0,07	-0,32	1,52
MK-8	20,0	0,19	0,06	-0,33	-0,34

56. günde GEO deneyinde ölçülen boy değişimi değerleri Şekil 8.1’ de şematize edilmiştir. Şekil 8.2’ de buhar kürü görmüş örneklerin 56. günde ölçülen genleşme değerleri kontrol karışımına (MK-1) göre kıyaslanmıştır.

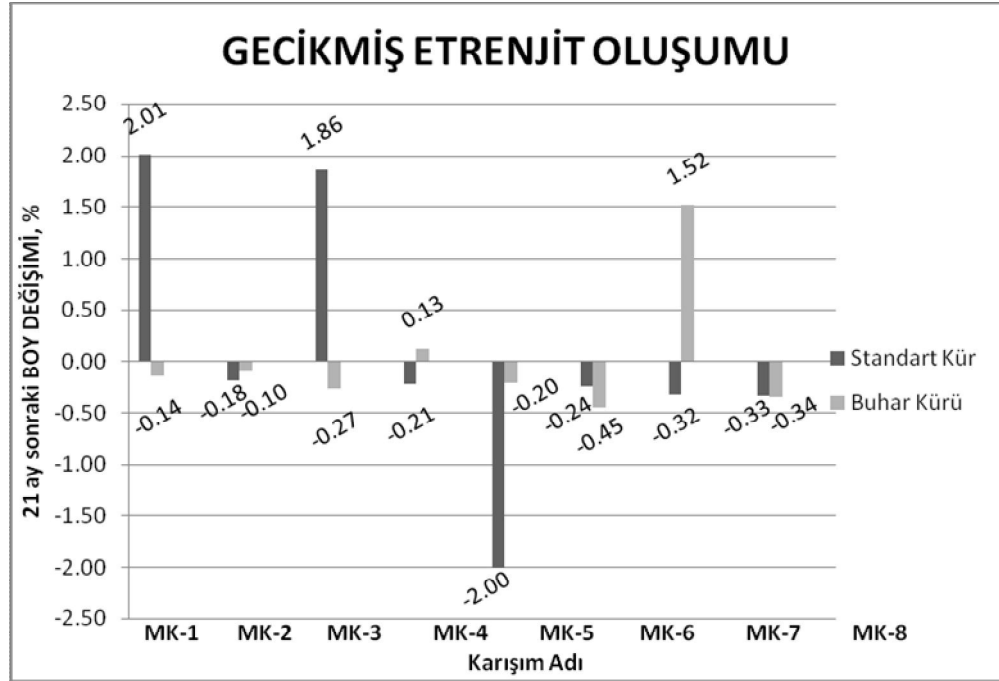


Şekil 8.1 GEO deneyinde I. grup örneklerde 56 gün sonra ölçülen boy değişimi değerleri.

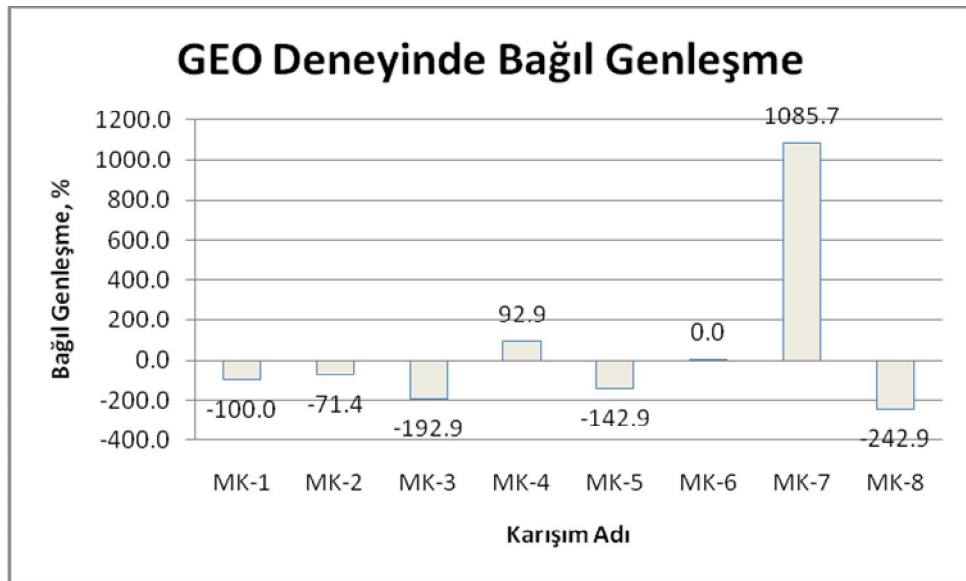


Şekil 8.2 GEO deneyinde I. Grup buhar kürü görmüş örneklerde 56 gün sonra ölçülen bağlı boy değişimi değerleri.

GEO deneyinde 21 ay sonra ölçülen boy değişimi değerleri Şekil 8.3' te gösterilmiştir. Şekil 8.4' te buhar kürü görmüş örneklerin 21 ay sonra ölçülen genleşme değerleri kontrol karışımına (MK-1) göre kıyaslanmıştır.

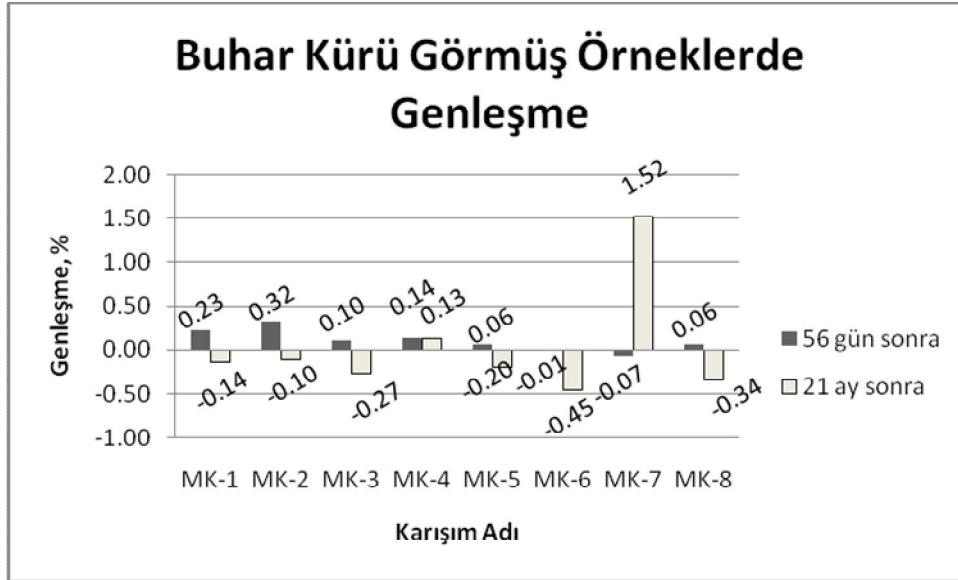


Şekil 8.3 GEO deneyinde I. grup örneklerde 21 ay sonra ölçülen boy değişimi değerleri.



Şekil 8.4 GEO deneyinde buhar kürü görmüş I. grup örneklerde 21 ay sonra ölçülen bağlı boy değişimi değerleri.

Şekil 8.5' te buhar kürü gören I. grup karışım örneklerinin 56 gün ve 21 ay sonra elde edilen genleşme değerleri gösterilmiştir.



Şekil 8.5 GEO deneyinde buhar kürü görmüş I. grup örneklerde 56 gün ve 21 ay sonra ölçülen boy değişimi değerleri.

56 gün sonunda süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerde %12,5 ve %15 MK içeren karışımlarda buhar kürü sonucunda büzülme gözlenmiştir. %2,5 MK ikame edilmiş örnekler dışında, mineral katkının etkinliği gözlenebilmektedir.

21 ay sonunda ölçülen genleşme değerlerinde standart kür gören örneklerin genleştiği, buhar kürü gören örneklerden MK-4 ve MK-7 genleşmiş, diğer tüm örnekler büzülmüştür. Buhar kürü görmüş örneklerin bağıl genleşme grafiğine bakıldığında ise MK-2 karışımı dışında tüm örnekler kontrol örneğinden daha az genleşmiş yada büzüşmüştür.

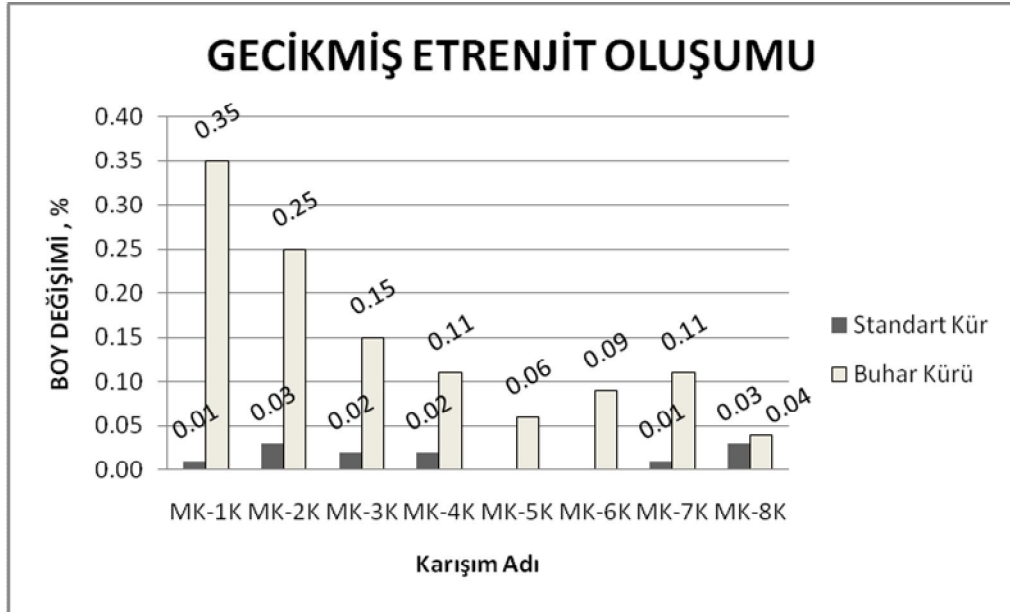
Buhar kürü geçirmiş örneklerde iki ölçüm karşılaştırıldığında 21 ay sonra yapılan ölçümlerde %15 MK içeren MK-7 karışımı dışında tüm karışımlarda büzülme gözlenmiştir.

Tablo 8.2' de gecikmiş etrenjit oluşumu deneyinde kullanılan, II grup karışımlarla hazırlanan numunelerin 56 gün ve 21 ay sonra sağladığı boy değişimi değerleri verilmiştir.

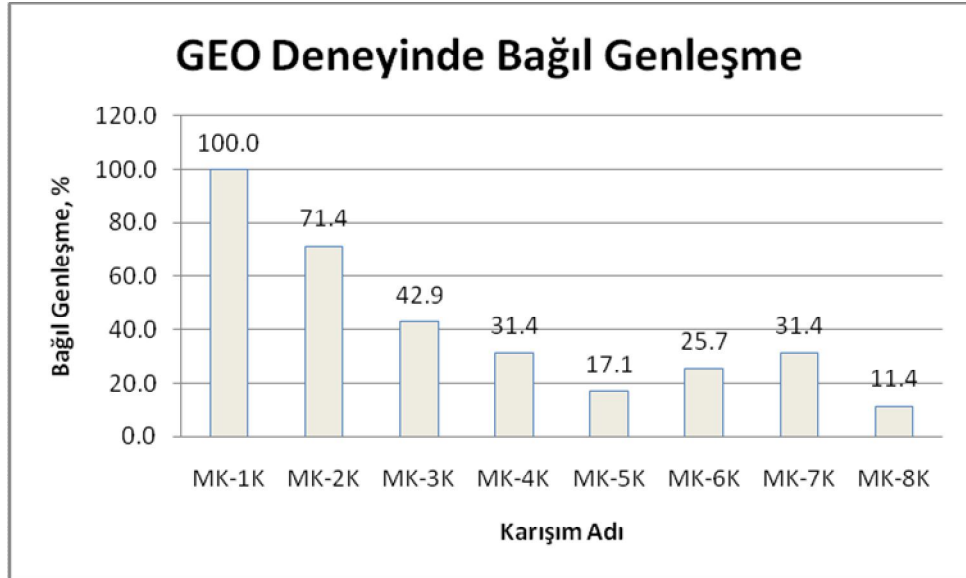
Tablo 8.2 GEO deneyinde kullanılan II. grup numunelerin 56. gün sonunda boy değişimi.

Karışım Adı	Karışım Oranları, %	Boy Değişimi, %			
		56. gün		21 ay sonra	
		Standart Kür	Buhar Kürü	Standart Kür	Buhar kürü
MK-1K	0,0	0,01	0,35	-0,14	0,42
MK-2K	2,5	0,03	0,25	-0,25	0,21
MK-3K	5,0	0,02	0,15	-0,18	0,21
MK-4K	7,5	0,02	0,11	-0,28	0,22
MK-5K	10,0	0,00	0,06	-0,34	0,02
MK-6K	12,5	0,00	0,09	-0,34	-0,02
MK-7K	15,0	0,01	0,11	-0,32	-0,24
MK-8K	20,0	0,03	0,04	-0,21	-0,03

56. günde GEO deneyinde ölçülen boy değişimi değerleri Şekil 8.6' da gösterilmiştir. Şekil 8.7' de buhar kürü gören örneklerin boy değişimlerinin kontrol örneği ile (MK-1K) karşılaştırılmıştır.

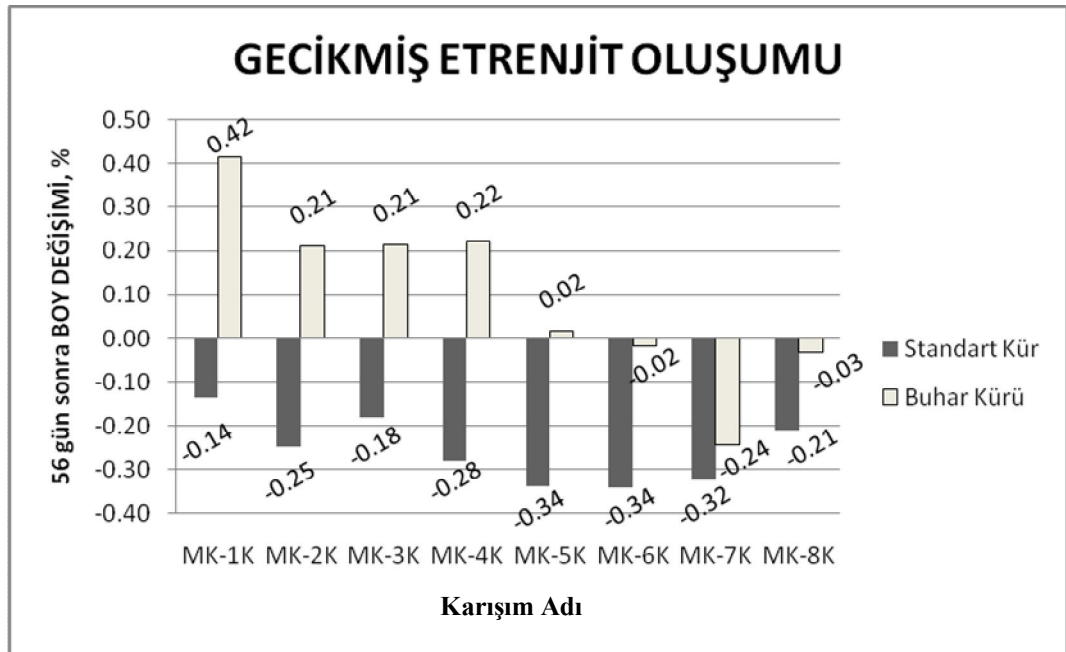


Şekil 8.6 GEO deneyinde II. grup karışım örneklerinin 56 gün sonunda boy değişimi değerleri.

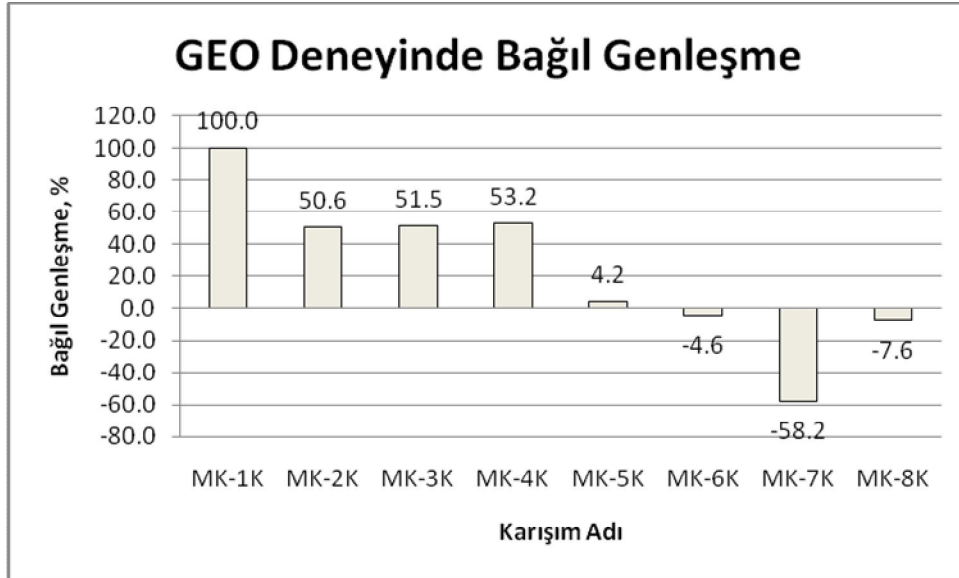


Şekil 8.7 GEO deneyinde buhar kürü görmüş II. grup örneklerin 56 gün sonra ölçülen bağıl boy değişimi değerleri.

21 ay sonunda GEO deneyinden elde edilen genleşme değerleri Şekil 8.8' de verilmiştir. Şekil 8.9' da buhar kürü gören örneklerin boy değişimlerinin kontrol örneği ile (MK-1K) karşılaştırılmıştır

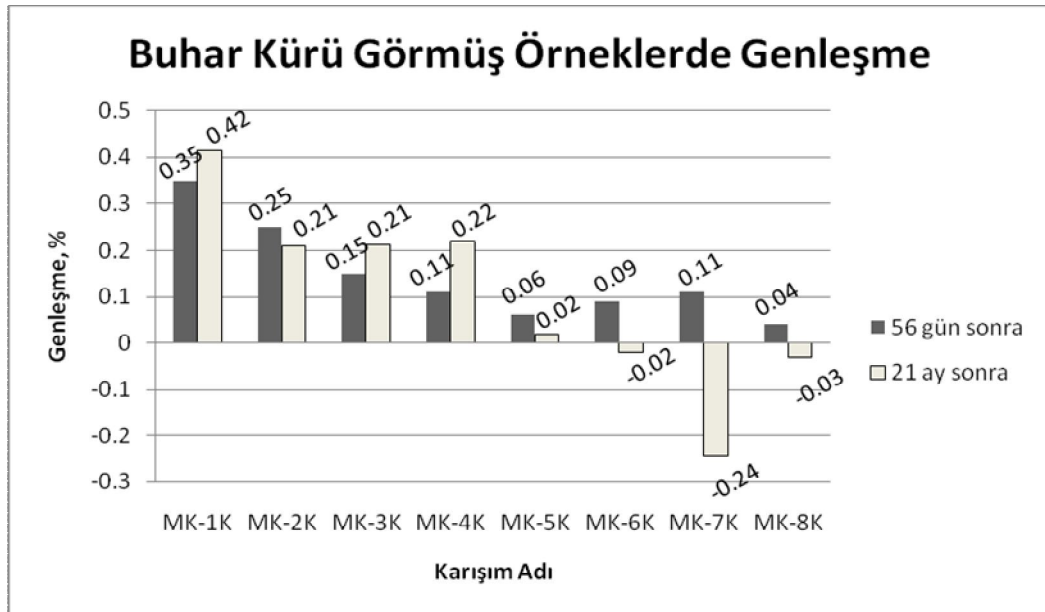


Şekil 8.8 GEO deneyinde II. grup örneklerin 21 ay sonunda boy değişimi değerleri.



Şekil 8.9 GEO deneyinde buhar kürü görmüş II. grup örneklerin 21 ay sonra ölçülen bağıl boy değişimi değerleri.

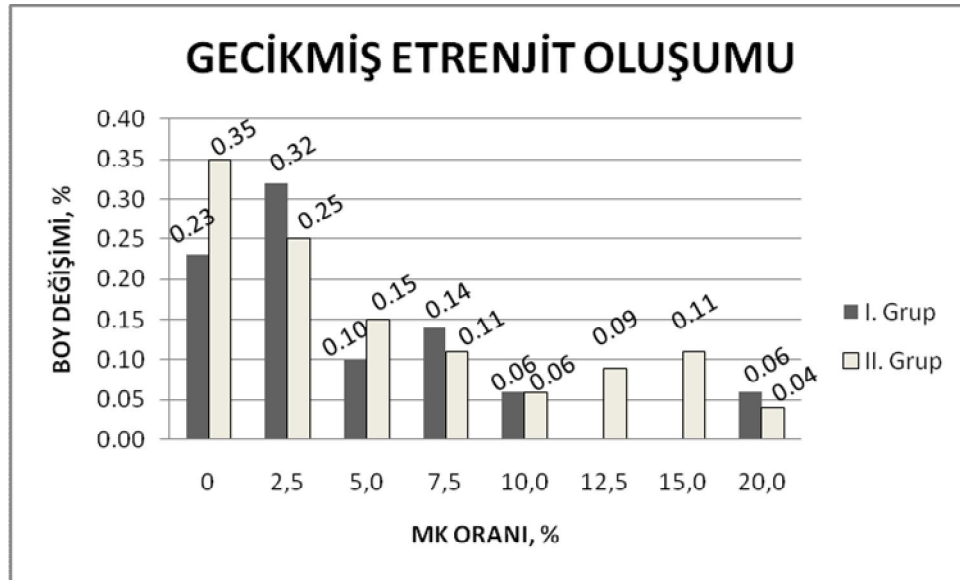
II. grup karışımlarla hazırlanan buhar kürü görmüş örneklerden 56 gün ve 21 ay sonunda elde edilen genleşme değerleri Şekil 8.10' da verilmiştir.



Şekil 8.10 GEO deneyinde buhar kürü görmüş II. grup örneklerde 56 gün ve 21 ay sonra ölçülen genleşme değerlerinin karşılaştırılması.

Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan II. grup örneklerden buhar kürü görmeyen örneklerde 56 gün sonra genleşme değeri çok düşüktür. Buhar kürü görmüş örneklerde ise ikame oranı arttıkça boy değişim miktarı azalmıştır. %12,5 ve %15 MK ikame edilen örneklerin genleşme değerinde bir artış gözlenmiş, %20 MK ikame edildiğinde yeniden düşüş gözlenmiştir.

21 ay sonunda yapılan ölçümlerde buhar kürü gören örneklerde genleşme değerleri 56. gün ölçülen değerlere oranla artmıştır. Ancak %10 ve daha yüksek ikame oranları için genleşme tersine dönmüş ve büzülme görülmüştür.

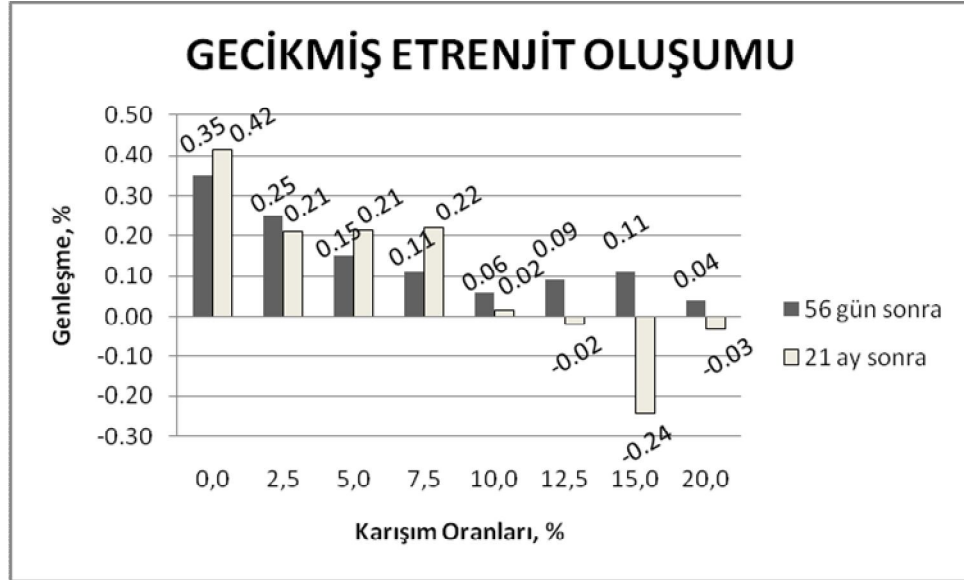


Şekil 8.11 I. ve II. grup karışımların 56. gün genleşme değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 8.11’ de süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan ve kullanılarak hazırlanan, buhar kürü görmüş MK ikameli örneklerin boy değişimleri karşılaştırılmıştır. Buna göre süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örnekler genel olarak süperakışkanlaştırıcı kullanılan örneklere göre daha iyi performans göstermiştir. II. grup karışımlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı karışımının daha iyi yerleşmesine sebep olmuştur. I. grup karışımlarda boşluk yapısı daha fazla olduğundan, oluşan etrenjit ürünü boşlukta genleşmiş olabilir. Bu sebeple I. grupta daha az genleşme oluşmuş olabilir. Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerde en iyi sonuçlar %12,5 ve %15 oranlarında gözlemlenirken, süperakışkanlaştırıcı kullanılan örneklerde %20 MK ikame edilen örnekler en iyi

sonucu sağlamıştır.

Şekil 8.12’ de I. ve II. grup buhar kürü görmüş örneklerin 21 ay sonunda elde edilen genişleme değerleri verilmiştir.



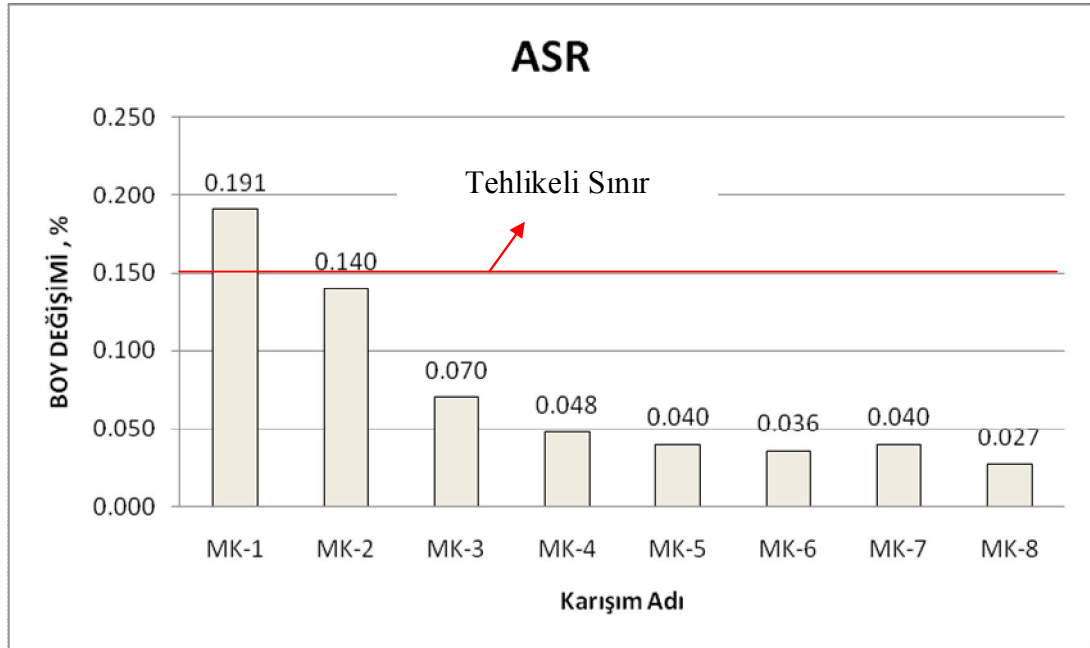
Şekil 8.12 I. ve II. grup karışımların 21 ay sonunda elde edilen genişleme değerleri.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre buhar kürü sırasında boşluk suyu sülfat konsantrasyonunu azaltan etkenin, MK’ dan gelen reaktif alümina olabilir. Çünkü sisteme giren reaktif alümina arttığında sülfat monosülfata dönüşüp çökmektedir. Monosülfata bağlanan sülfat boşluk suyundan uzaklaştığı için CSH bünyesine adsorblanan sülfat miktarı azalacaktır. Dolayısıyla soğuma ve suda bekleme döneminde CSH’ dan salınan sülfat azalacağından, açığa salınan sülfatın sonradan monosülfatla reaksiyona girip etrenjit oluşturma potansiyeli ortadan kalkacaktır (Tosun, 2007). Ancak hava kürü sırasında örnekler büzüldüğünden kesin bir yargıya varmak söz konusu değildir.

8.1.2 Alkali Silika Reaksiyonu Deneyi Sonuçları

14 günlük hızlandırılmış ASR deneyi (CSA23.2-25A) sonucunda süperakışkanlaştırıcı kullanılmayan örneklerde gözlenen boy değişimi Şekil 8.13’de

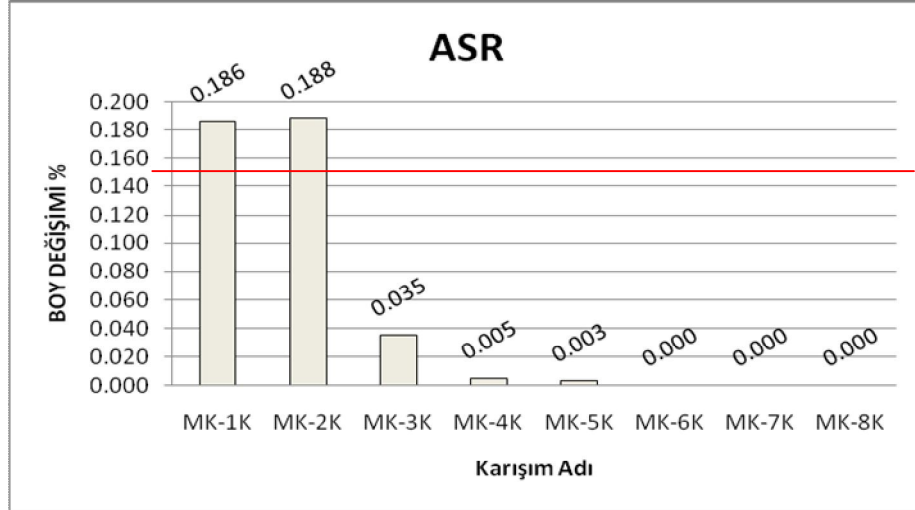
verilmiştir.



Şekil 8.13 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan ASR örneklerinin hızlandırılmış deney yönteminden sonra genleşme değerleri.

Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerde kontrol karışımı dışında tüm ikame oranları için genleşme değerleri Kanada standardı (CSA23.2-25) tehlikeli sınırının altında kalmıştır. Artan ikame oranları için genleşme değerinin azaldığı görülmektedir. En düşük genleşme değeri %20 MK ikame edilmiş karışım olan MK-8’ de görülmektedir.

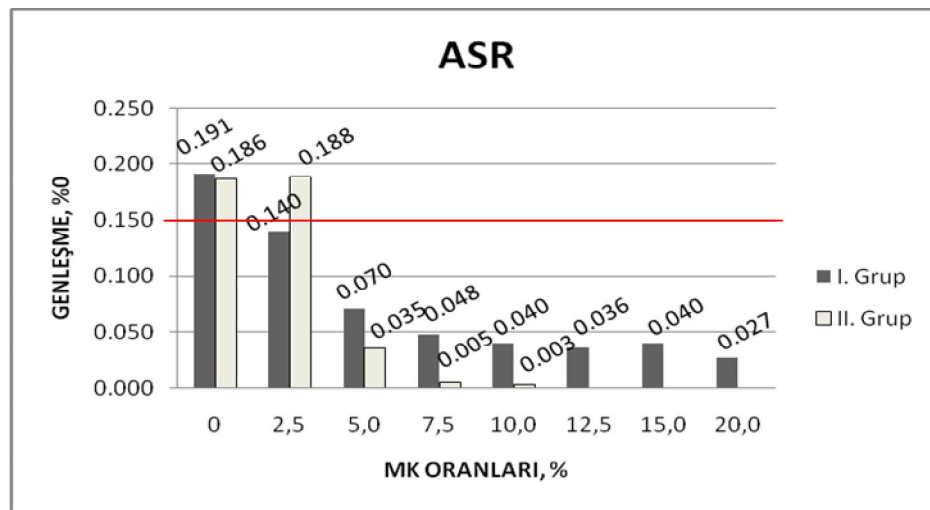
Şekil 8.14’ te II. grup karışımla hazırlanan örneklerde gözlenen genleşme değerleri verilmiştir.



Şekil 8.14 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan ASR örneklerinin hızlandırılmış deney yönteminden sonra genleşme değerleri.

Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan ASR harç çubuğu örneklerinde kontrol karışımı ve %2,5 MK ikame edilen karışımlarda genleşme değerlerinin tehlikeli sınır olan %0 1,5 değerinin üstüne çıktığı gözlenmiştir. Artan ikame oranları için genleşme değerleri azalmış %12,5, %15 ve %20 ikame oranları için genleşme gözlenememiştir.

Şekil 8.15' te I. ve II. grup karışımlarla hazırlanan örneklerin ASR genleşmeleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 8.15 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan ve kullanılarak hazırlanan harç çubuğu örneklerinin genleşmelerinin karşılaştırılması.

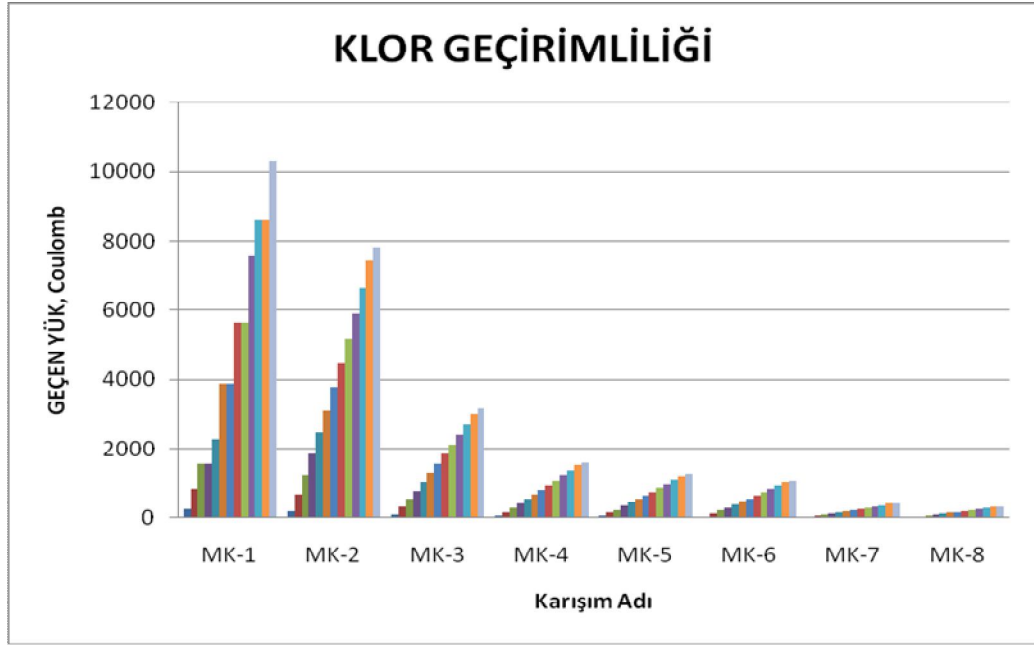
Şekil 8.15’ te I. ve II. grup karışımlar kullanılarak hazırlanan örnekler karşılaştırıldığında, süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin diğerlerine göre daha iyi performans gösterdikleri gözlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkının işlenebilirliği arttırmaktadır. İşlenebilirliğin artması harcın kalıba daha iyi yerleşmesini ve daha iyi sıkışmasını sağladığından, harçtaki boşluk oranı azalır. Bu sebeple süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan harç çubukları, kullanılmayanlara göre daha iyi performans sergilemiş olabilir.

8.1.3 Klor Geçirimsizliği Deneyi Sonuçları

ASTM C 1202 – 97 standardına uygun olarak hazırlanan klor geçirimsizliği örneklerinden 6 saatlik deney süresi sonunda geçen elektrik akımı süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan karışımlar için Tablo 8.3’ te verilmiştir.

Tablo 8.3 Klor geçirimsizliği deneyi için süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerden 6 saat sonunda geçen elektrik akımı.

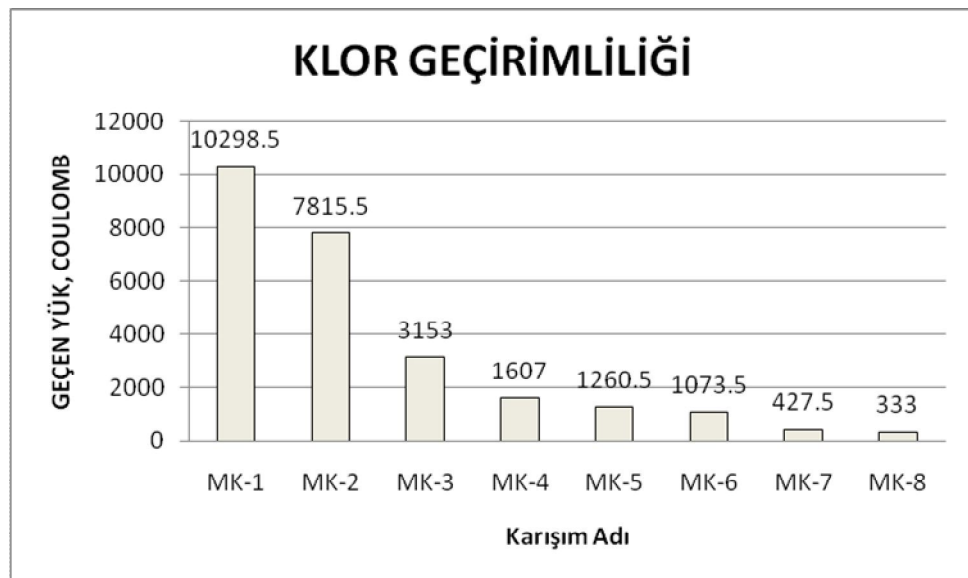
	ELEKTRİK YÜKÜ (coulomb)	KLOR GEÇİRİMLİLİĞİ
MK-1	10299	YÜKSEK
MK-2	7816	YÜKSEK
MK-3	3153	ORTA
MK-4	1607	DÜŞÜK
MK-5	1261	DÜŞÜK
MK-6	1074	DÜŞÜK
MK-7	428	ÇOK DÜŞÜK
MK-8	333	ÇOK DÜŞÜK



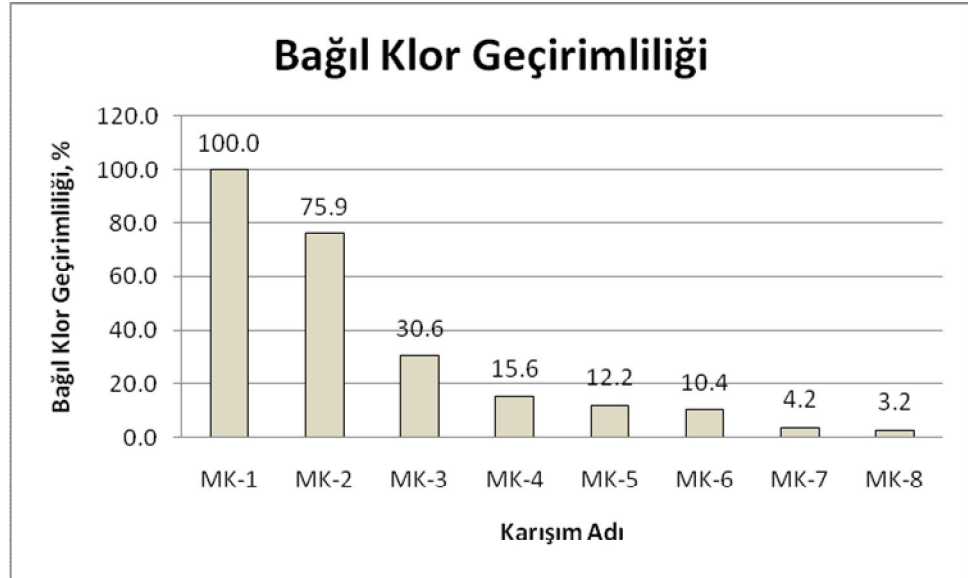
Şekil 8.16 Klor geçirimliliği deneyinde 30 dakika aralıkla kümülatif olarak ölçülen elektrik akımı değerlerinin katkı oranlarına göre sıralanması.

Şekil 8.16’ da görüldüğü gibi katkı oranının artması örneklerden geçen elektrik akımını büyük ölçüde azaltmıştır. MK kullanımı, betonda boşluk miktarını azalttığından daha düşük klor geçirimliliği sağlamaktadır.

Şekil 8.17 ‘de I. grup örneklerden 6 saat boyunca geçen toplam elektriksel yük verilmiştir. Şekil 8.18 ‘ de örnekler kontrol örneği (MK-1) ile kıyaslanmıştır.



Şekil 8.17 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerden 6 saat boyunca geçen toplam elektriksel yük.



Şekil 8.18 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerden geçen elektriksel yükün kontrol karışımından geçen toplam elektriksel yük ile kıyaslanması.

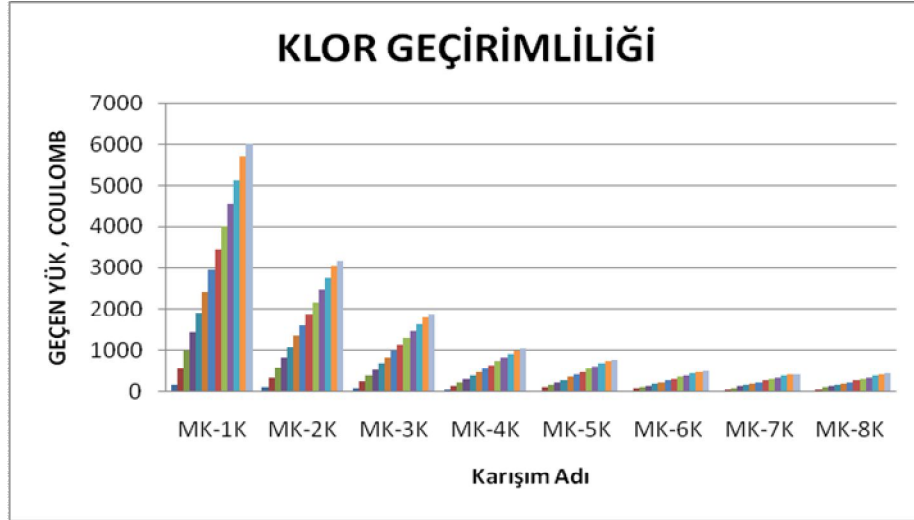
Şekil 8.17 ve 8.18’ de de görüldüğü gibi 6 saat süren deneyin sonucunda, geçen elektriksel yük ve dolayısıyla klor geçirirnililiği MK ikamesi ile ters orantılı olarak değişim göstermektedir.

Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan klor geçirirnililiği örneklerinden 6 saat sonunda geçen elektrik yükü değerleri Tablo 8.4’ de verilmiştir.

Tablo 8.4 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan klor geçirirnililiği örneklerinden deney sonunda geçen toplam yük.

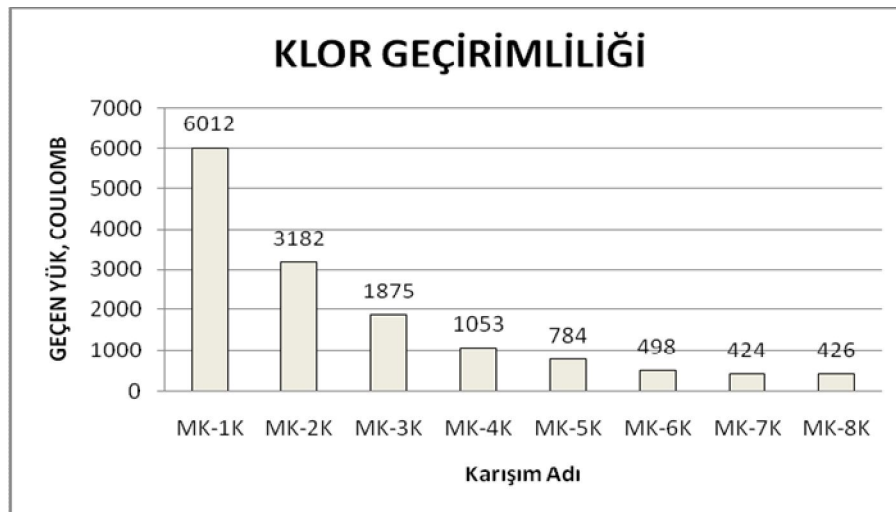
	ELEKTRİK YÜKÜ (coulomb)	KLOR GEÇİRİMLİLİĞİ
MK-1K	6012	YÜKSEK
MK-2K	3182	ORTA
MK-3K	1875	DÜŞÜK
MK-4K	1053	DÜŞÜK
MK-5K	784	ÇOK DÜŞÜK
MK-6K	498	ÇOK DÜŞÜK
MK-7K	424	ÇOK DÜŞÜK
MK-8K	426	ÇOK DÜŞÜK

Şekil 8.19' da süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan klor geçirimliliği deneyi örneklerinden geçen toplam elektrik yükü değerleri verilmiştir. Buna göre, en yüksek ikame oranına sahip karışım olan MK-8K' da en düşük yük değerleri tespit edilmiştir.

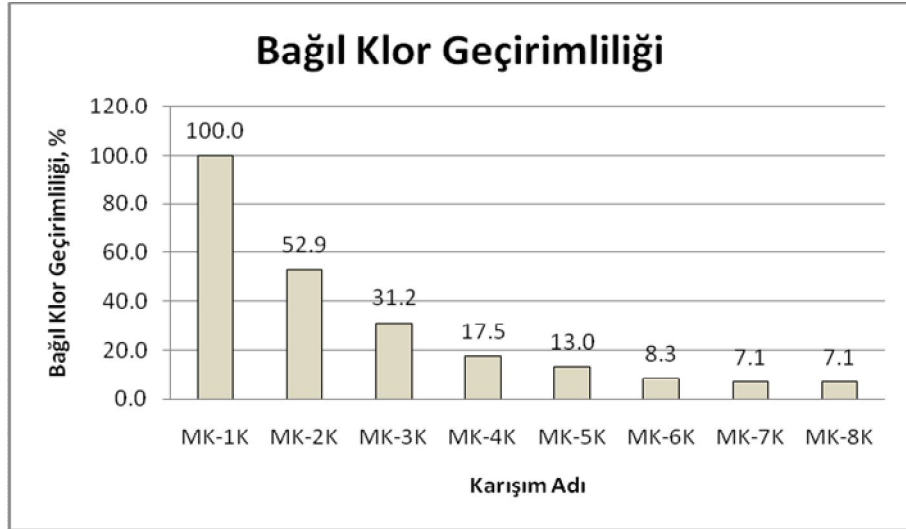


Şekil 8.19 Klor geçirimliliği deneyinde 30 dakika aralıkla kümülatif olarak ölçülen elektrik akımı değerlerinin katkı oranlarına göre sıralanması.

Şekil 8.20' de örneklerden 6 saat boyunca geçen toplam yük gösterilmiştir. Şekil 8.19' da ise örneklerden geçen elektrikselsel yük kontrol karışımı ile karşılaştırılmıştır.



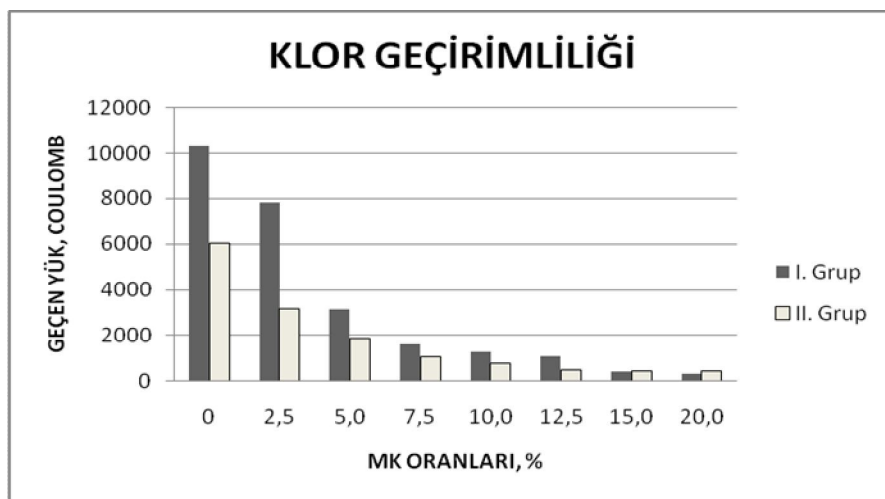
Şekil 8.20 Klor geçirimliliği deneyinde 6 saat sonunda süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerden geçen toplam yük miktarları.



Şekil 8.21 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerden geçen toplam yük miktarlarının kontrol örneği ile kıyaslanması.

Şekil 8.20 ve 8.21’ de görüldüğü gibi yüksek oranda MK ikame edilmesi geçen elektrik yükünü en aza indirmiştir. %15 ve %20 MK ikameli karışımlar yaklaşık olarak aynı davranışı göstermişlerdir.

Şekil 8.22’ de her iki grup örneklerden geçen toplam elektriksel yük karşılaştırılmıştır.



Şekil 8.22 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmamış ve kullanılan karışımlarla hazırlanan örneklerden geçen yüklerin karşılaştırılması.

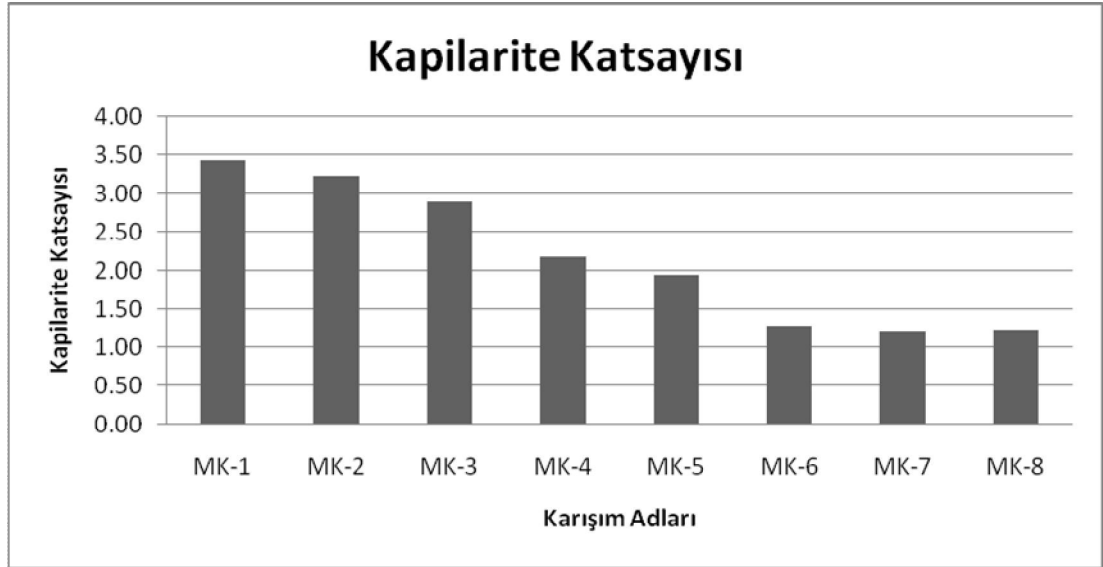
Şekil 8.22’ de süperakışkanlaştırıcı kullanılmayan ve kullanılan karışımlarla hazırlanan örneklerden deney sonunda geçen toplam elektriksel yük karşılaştırılmıştır. Örnekler her iki grup için de benzer davranış göstermişlerdir ve ikame oranı arttıkça geçen toplam yük azalmıştır. Süperakışkanlaştırıcı kullanılan örneklerde geçen toplam yük diğer örneklere oranla daha azdır. MK kullanımı gözenekliliği ve boşluk yapısını azaltmıştır. Ayrıca süperakışkanlaştırıcı kullanımı işlenebilirliği arttırdığı için harç kalıba daha iyi yerleşmiş ve boşluk yapısı azalmıştır. Böylece geçen elektriksel yük azalmış ve süperakışkanlaştırıcı kullanılan harçlar daha iyi performans sergilemişlerdir.

8.1.4 Kapiler ve Toplam Su Emme Deneyi Sonuçları

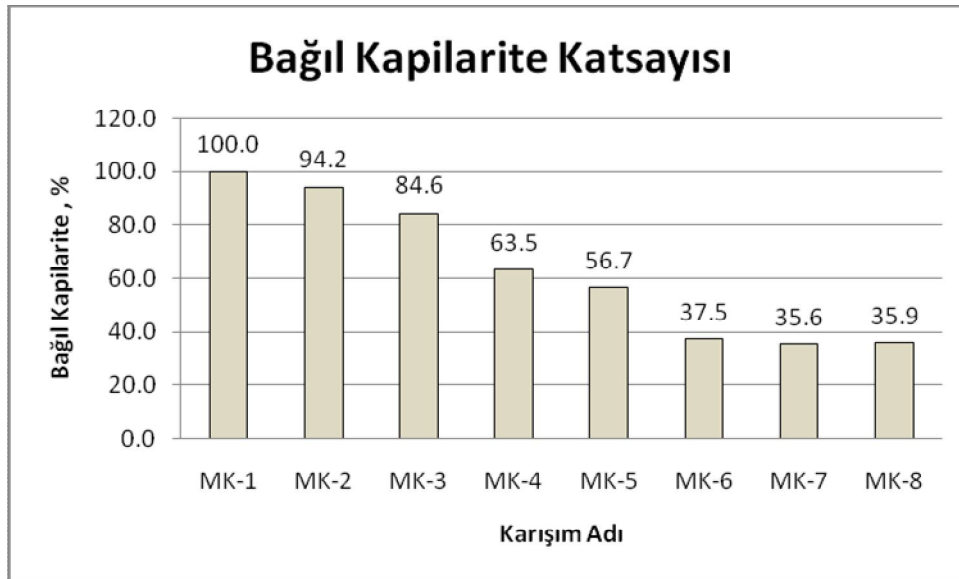
Kapiler su emme deneyi için hazırlanan süperakışkanlaştırıcı içermeyen örneklerin su emme değerleri Tablo 8.5’ de verilmiştir. Şekil 8.23’ te I grup örneklerin kapilarite katsayısı değerleri verilmiştir. Şekil 8.24’ te I. grup örneklerin kapilarite katsayıları kontrol örneği (MK-1) ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 8.5 Kapiler su emme deneyi için süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan ve 28 gün kirece doygun suda bekletilen örneklerin ağırlık değişimleri ve kapilarite katsayısı.

Örnek Adı	Örnek Ağırlıkları, gr		Kapiler Su Miktarı,gr	Kapilarite Katsayısı, cm ² /sn
	Kuru	24 saat sonra		
MK-1	579.0	599.8	20.8	3.43
MK-2	589.9	609.5	19.6	3.23
MK-3	597.9	615.5	17.6	2.90
MK-4	595.4	608.6	13.2	2.17
MK-5	593.5	605.3	11.8	1.94
MK-6	601.9	609.7	7.8	1.28
MK-7	591.7	599.1	7.4	1.22
MK-8	595.5	602.9	7.5	1.23



Şekil 8.23 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin kapilarite (kılcallık) katsayısı değerleri.



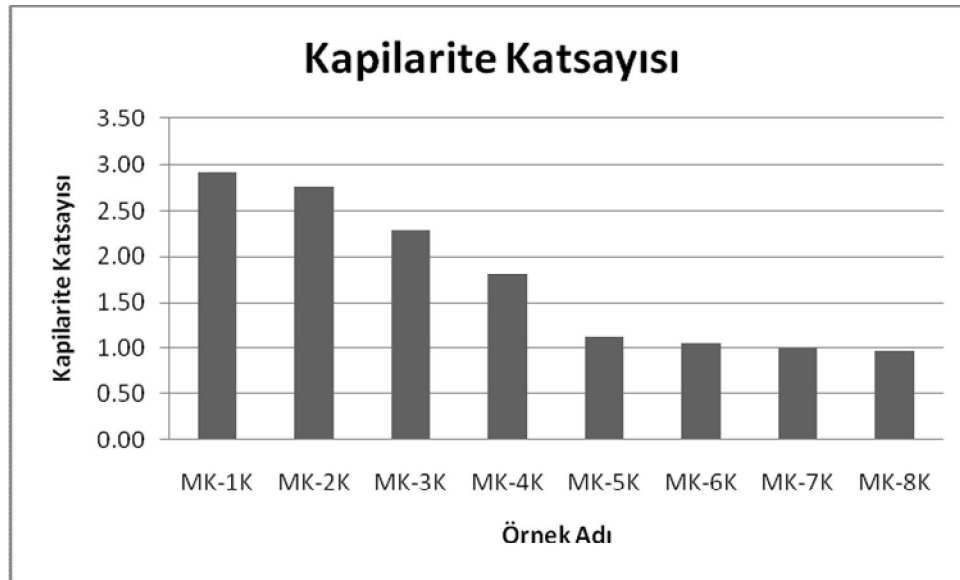
Şekil 8.24 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin kapilarite katsayılarının kontrol örneği ile karşılaştırılması.

Şekil 8.23' te süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanmış örneklerin kapilarite katsayıları grafiksel olarak ifade edilmiştir. Buna göre, kapilarite katsayısında, artan MK oranı için azalan bir davranış gözlenmiştir. Şekil 8.24' e bakıldığında kapilarite katsayısının katkı oranı arttıkça azalmaktadır.

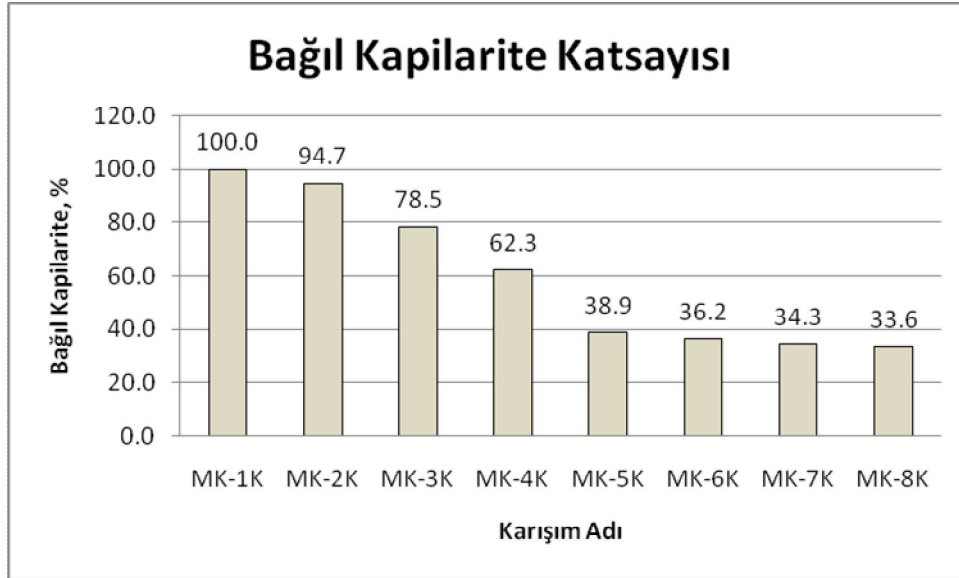
Tablo 8.6 Kapiler su emme deneyi için süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan ve 28 gün kirece doygun suda bekletilen örneklerin ağırlık değişimleri (gram cinsinden) ve kapilarite katsayısı.

Örnek Adı	Örnek Ağırlıkları, gr		Kapiler Su, gr	Kapilarite Katsayısı, cm^2/sn
	Kuru	24 Saat Sonra		
MK-1K	590.0	607.7	17.7	2.91
MK-2K	575.7	592.5	16.7	2.76
MK-3K	591.1	605.0	13.9	2.28
MK-4K	607.3	618.3	11.0	1.81
MK-5K	584.5	591.4	6.9	1.13
MK-6K	597.8	604.2	6.4	1.05
MK-7K	607.7	613.7	6.1	1.00
MK-8K	606.3	612.3	5.9	0.98

Şekil 8.25' te II. grup örneklerin kapilarite katsayısı grafiği verilmiştir. Şekil 8.24' te aynı örneklerin kontrol örneği (MK-1K) ile karşılaştırılmıştır.

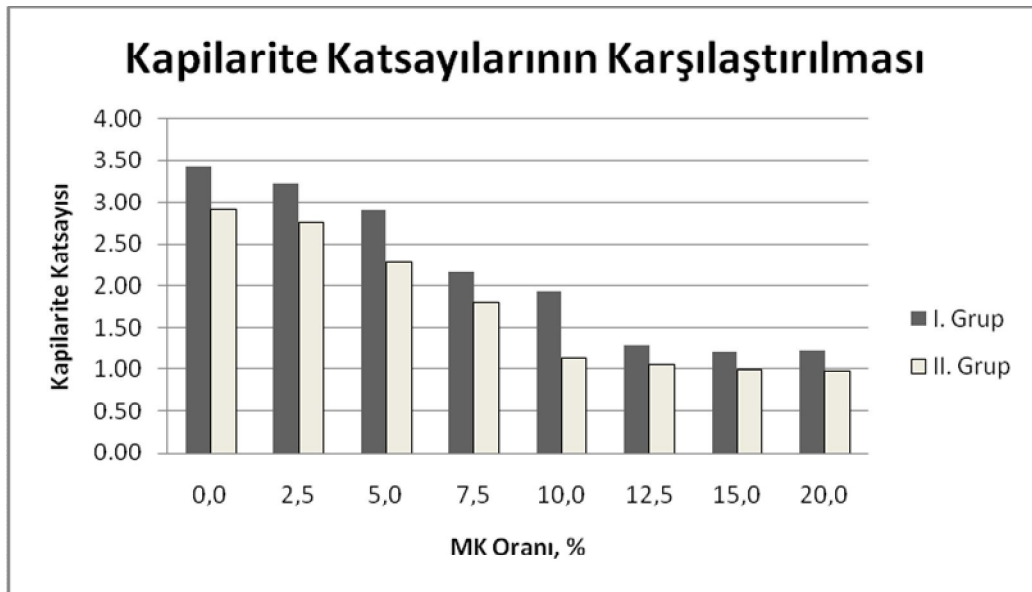


Şekil 8.25 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin kapilarite (kılcılık) katsayısı değerleri.



Şekil 8.26 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin kapilarite (kılcallık) katsayısı değerlerinin kontrol örneği ile karşılaştırılması.

Şekil 8.25’ de süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan karışımların kapilarite katsayıları grafik olarak hazırlanmıştır. Buna göre, MK ikame oranı arttıkça kapilarite katsayısı da azalmıştır. %12,5, 15 ve 20 katkı oranı olan örnekler benzer davranış göstermiştir. Şekil 8.27’ te I. ve II. grup örneklerin kapilarite katsayıları karşılaştırılmıştır.



Şekil 8.27 Süperakışkanlaştırıcı kullanmadan ve kullanılarak hazırlanan örneklerin kapilarite katsayılarının karşılaştırılması.

Şekil 8.27’ de her iki grup karışım için bulunan kapilarite katsayıları karşılaştırılmıştır. Oluşturulan grafiğe göre süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin performansı diğerlerine oranla daha düşüktür.

Örnekler kapiler su emme deneyinin ardından 24 saat boyunca tamamen suya batırılarak bekletilmiş ve toplam su emme değerlerine bakılmıştır. Deneyden çıkan sonuçlar Tablo 8.7 ve Tablo 8.8’ de verilmiştir. Oluşturulan tablolardan yola çıkılarak çizilen grafikler Şekil 8.28 ve 8.29’ da verilmiştir.

Tablo 8.7 I. grup örneklerin toplam su emme değerleri.

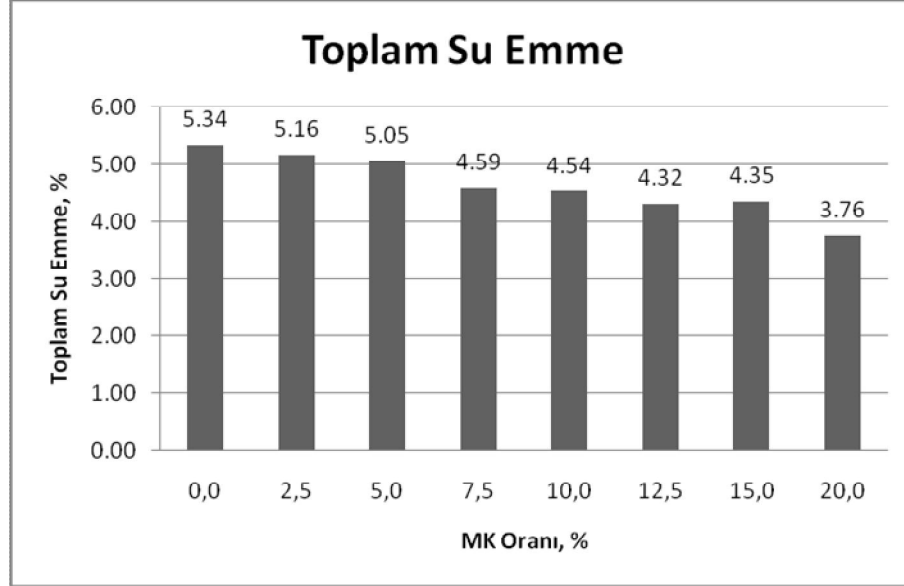
Örnek Adı	Örnek Ağırlıkları, gr		Emilen Toplam Su, gr	Toplam Su Emme, %
	Kuru	24 Saat Sonra		
MK-1	579.0	609.9	30.9	5.34
MK-2	589.9	620.4	30.5	5.16
MK-3	597.9	628.1	30.2	5.05
MK-4	595.4	622.7	27.3	4.59
MK-5	593.5	620.5	26.9	4.54
MK-6	601.9	627.9	26.0	4.32
MK-7	591.7	617.5	25.7	4.35
MK-8	595.5	617.9	22.4	3.76

Tablo 8.8 II. grup örneklerin toplam su emme değerleri.

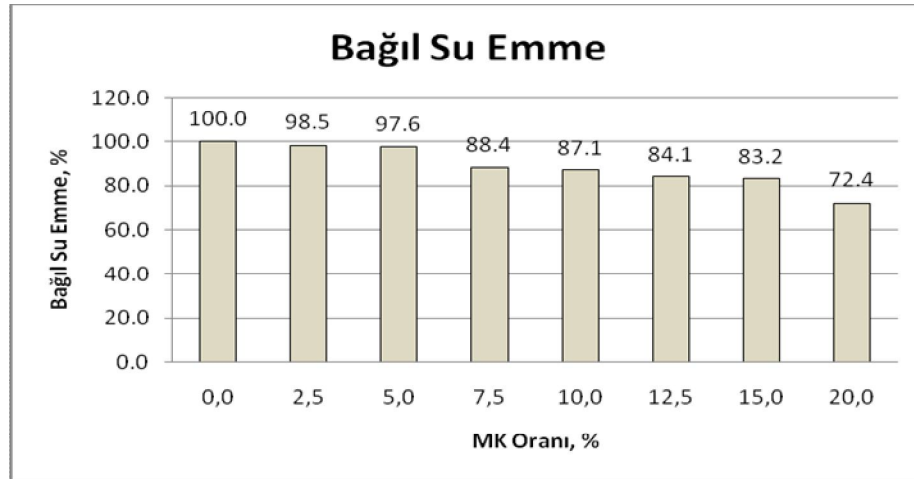
Örnek Adı	Örnek Ağırlıkları, gr		Emilen Toplam Su, gr	Toplam Su Emme, %
	Kuru	24 Saat Sonra		
MK-1K	590.0	619.6	29.6	5.02
MK-2K	575.7	602.5	26.8	4.65
MK-3K	591.1	618.1	26.9	4.56
MK-4K	607.3	632.9	25.5	4.20
MK-5K	584.5	605.5	21.0	3.59
MK-6K	597.8	618.1	20.3	3.39
MK-7K	607.7	626.3	18.7	3.07
MK-8K	606.3	620.7	14.3	2.36

Şekil 8.28’ de I. grup örneklerin toplam su emme değerleri incelenmiştir. Şekil 8.29’ da bu örneklerin toplam su emme değerlerinin kontrol örneği ile (MK-1)

kıyaslanmıştır.



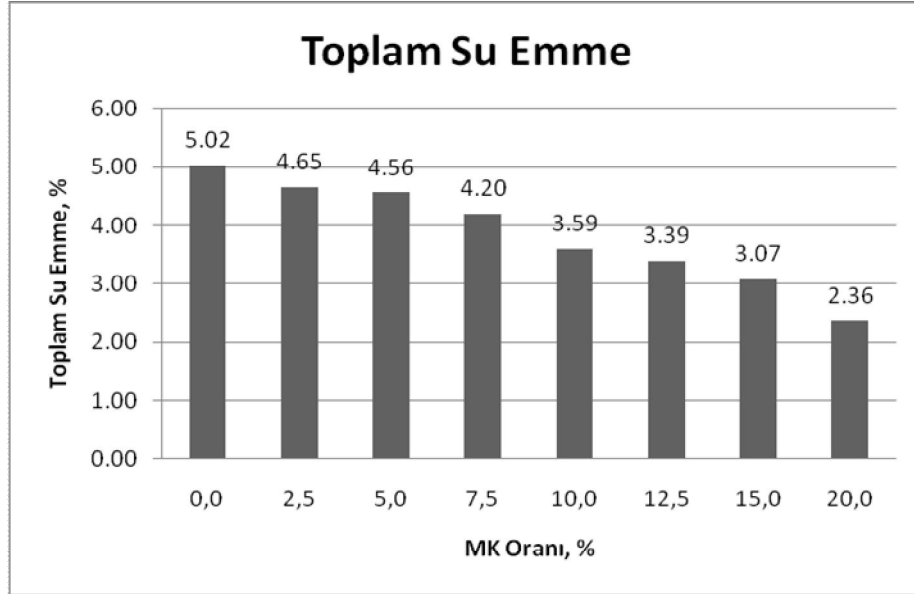
Şekil 8.28 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin toplam su emme değerleri.



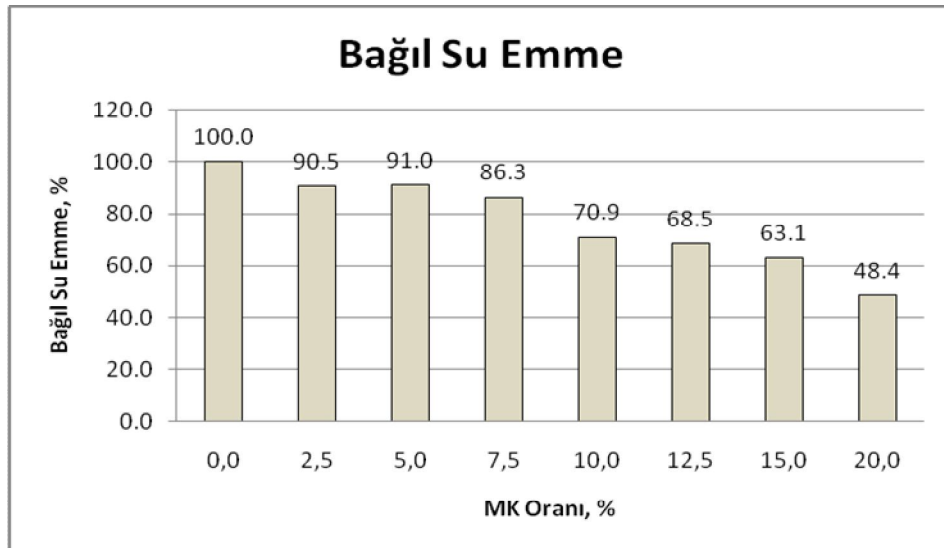
Şekil 8.29 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin toplam su emme değerlerinin kontrol örneği ile karşılaştırılması.

Şekil 8.28’ de görüldüğü gibi toplam su emme değerleri katkı oranı ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Şekil 8.29’ da bağıl su emme değerleri katkı oranı arttıkça azalmaktadır.

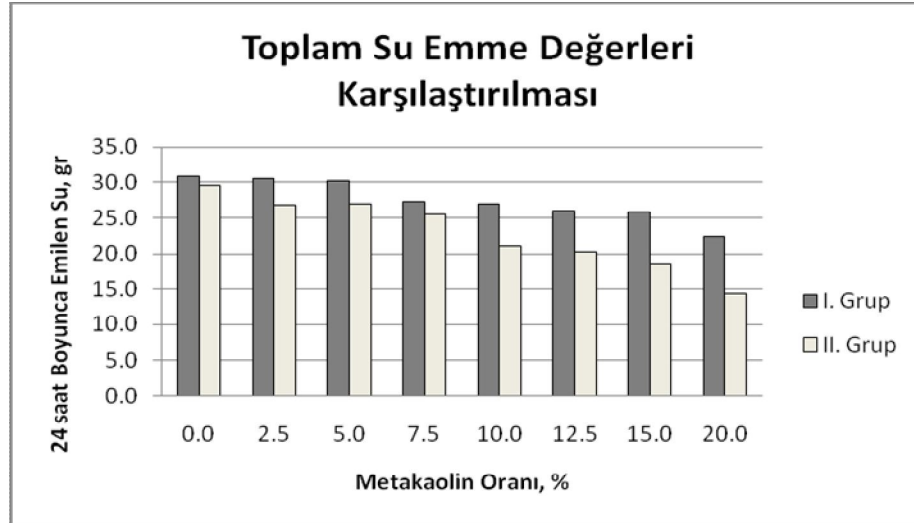
Şekil 8.30' da II. grup örneklerin toplam su emme değerleri verilmiştir. Şekil 8.31' de toplam su emme değerleri kontrol örneği ile (MK-1K) karşılaştırılmıştır. Şekil 8.32' de I. ve II. grup örneklerin 24 saat boyunca emdikleri su miktarları karşılaştırılmıştır.



Şekil 8.30 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin toplam su emme değerleri.



Şekil 8.31 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin toplam su emme değerlerinin kontrol örneği ile karşılaştırılması.



Şekil 8.32 I. ve II. grup örneklerin toplam su emme değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 8.32’ de iki grup örnekler karşılaştırılmıştır. Buna göre, MK oranı arttıkça emilen su miktarı azalmıştır. Süperakışkanlaştırıcı kullanımı emilen suyun miktarını azaltmada yardımcı olmuş, bu sebeple II grup örnekler daha az su emmiştir.

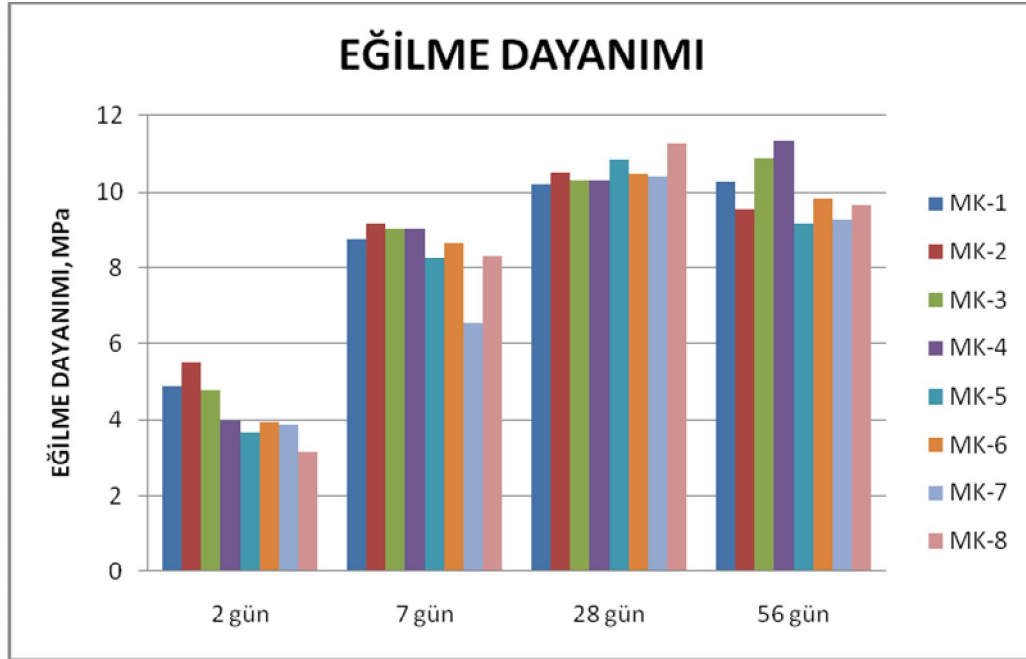
8.1.5 Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneylerinin Sonuçları

Tablo 8.9’ da süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan prizmatik harç numunelerin yaşlarına göre eğilme dayanımları verilmiştir.

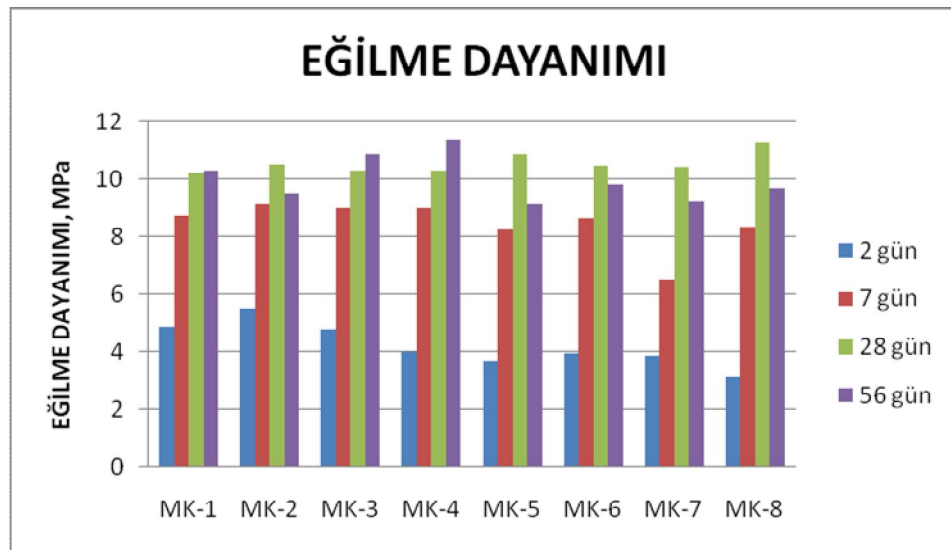
Tablo 8.9 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan prizmatik harç örneklerinin eğilme dayanımları (MPa).

Karışım Adı	Eğilme Dayanımları, MPa			
	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün
MK-1	4.89	8.76	10.22	10.28
MK-2	5.49	9.15	10.5	9.52
MK-3	4.78	9.03	10.29	10.88
MK-4	3.98	9.03	10.29	11.35
MK-5	3.68	8.25	10.86	9.15
MK-6	3.93	8.64	10.48	9.82
MK-7	3.88	6.53	10.41	9.25
MK-8	3.15	8.33	11.29	9.68

Şekil 8.33 ve 8.34' te süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin eğilme dayanımları verilmiştir. Buna göre 2. ve 7. gün eğilme dayanımları içinde en yüksek değeri MK-2 sağlamıştır. 28. günde en yüksek eğilme dayanımı değerini MK-8 sağlarken, MK-4 karışımı 56. günde en yüksek eğilme dayanımı değerini vermiştir

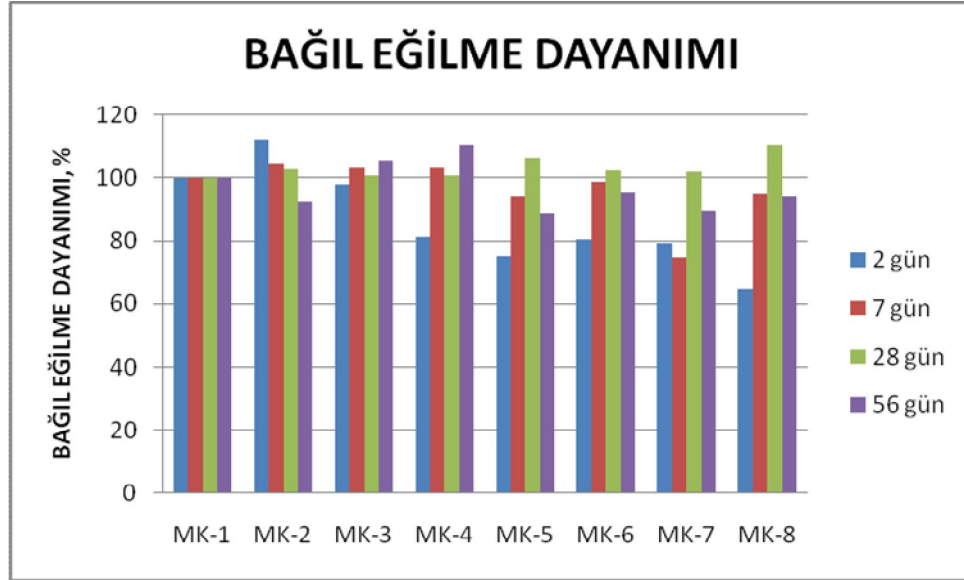


Şekil 8.33 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanmış örneklerin yaşlarına göre eğilme dayanımları.



Şekil 8.34 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan karışımların eğilme dayanımları.

Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin eğilme dayanımları kontrol örneğinin eğilme dayanımına oranlanmıştır. Çıkan sonuçların göstergesinde Şekil 8.35' deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 8.35 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin bağıl eğilme dayanımları.

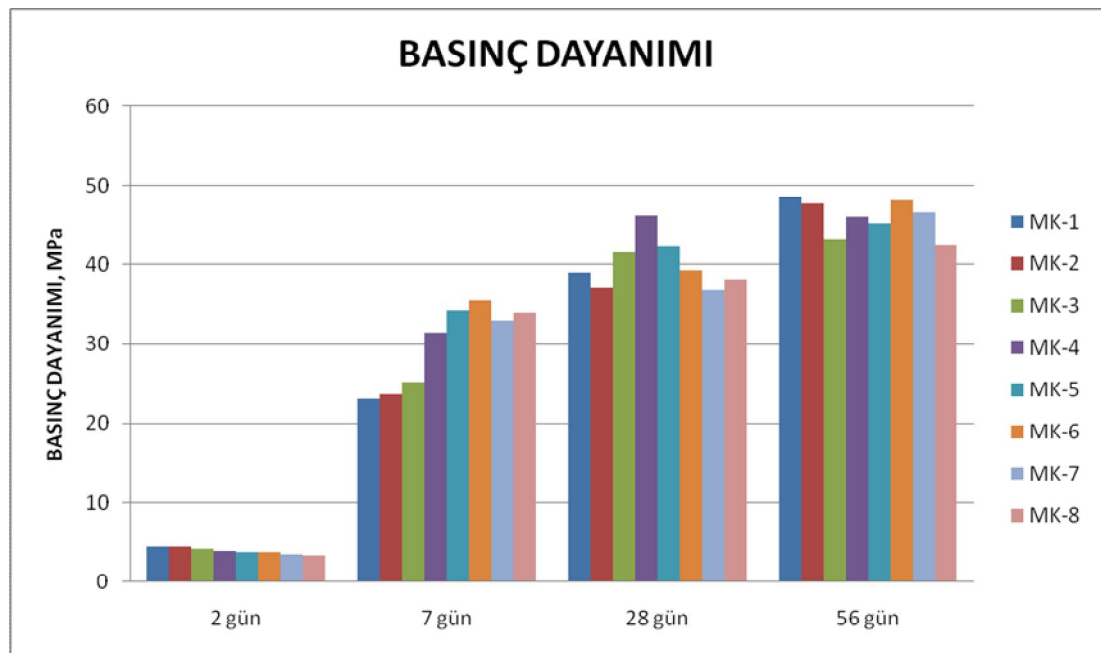
Şekil 8.35' e göre tüm karışım oranları için en iyi değerler 28. günde elde edilen değerlerdir. MK-3 ve MK-4 karışımları için en yüksek değerler 56. günde sağlanmıştır. İkame oranının artması ileri yaşlarda (28 ve 56. günler) daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir.

Tablo 8.10' da süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin basınç dayanımları yer almaktadır.

Tablo 8.10 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin basınç dayanımları (MPa).

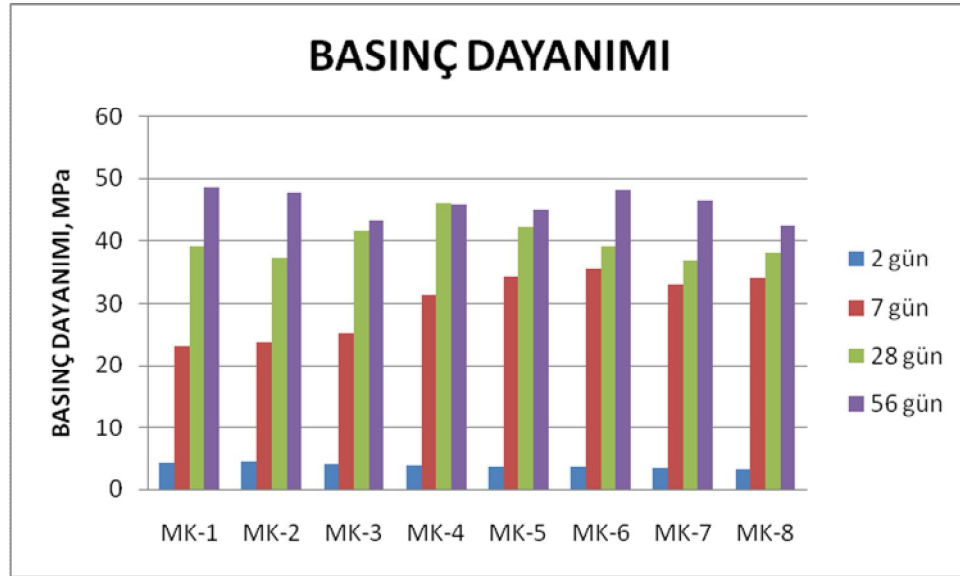
Karışım Adı	Basınç Dayanımları, MPa			
	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün
MK-1	4.44	23.17	39.07	48.61
MK-2	4.47	23.74	37.25	47.72
MK-3	4.12	25.25	41.59	43.27
MK-4	3.85	31.42	46.22	46.02
MK-5	3.77	34.23	42.31	45.16
MK-6	3.71	35.45	39.22	48.17
MK-7	3.45	33.03	36.84	46.61
MK-8	3.30	33.94	38.17	42.36

Şekil 8.36' da süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin yaşlarına göre basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Buna göre erken yaşlarda ikame oranıyla ters orantılı olan basınç dayanımı ileri yaşlarda artış eğilimine girmiştir. 28. günde en yüksek basınç dayanımını %7,5 MK içeren karışım sağlarken 56. günde en yüksek basınç dayanımına kontrol örnekleri ulaşmıştır.



Şekil 8.36 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin yaşlarına göre basınç dayanımı değerleri.

Şekil 8.37’ de süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin basınç dayanımı değerleri verilmiştir. 2. Gün dayanım değeri en düşük olan karışım en yüksek MK ikame edilmiş olan MK-8’ dir. Tüm karışım oranları ilerleyen yaşlarında benzer davranışlar göstermişlerdir. Ancak MK-4 karışımının 28. gün dayanımı 56. gün dayanımına göre az da olsa yüksektir. Bunun nedeni harcın kalıba iyi yerleştirilmemesi olabilir.

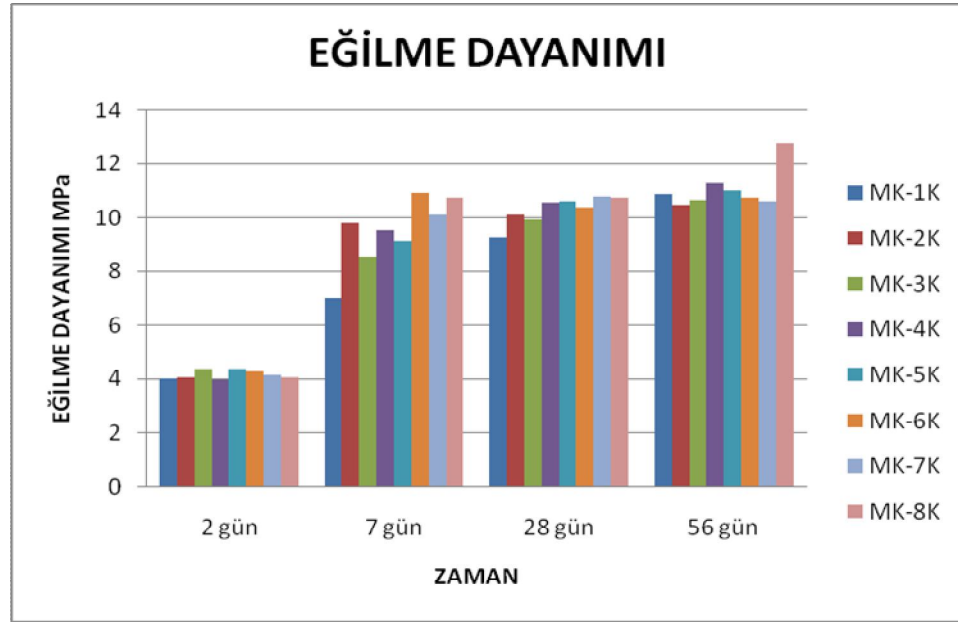


Şekil 8.37 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin basınç dayanımı değerleri.

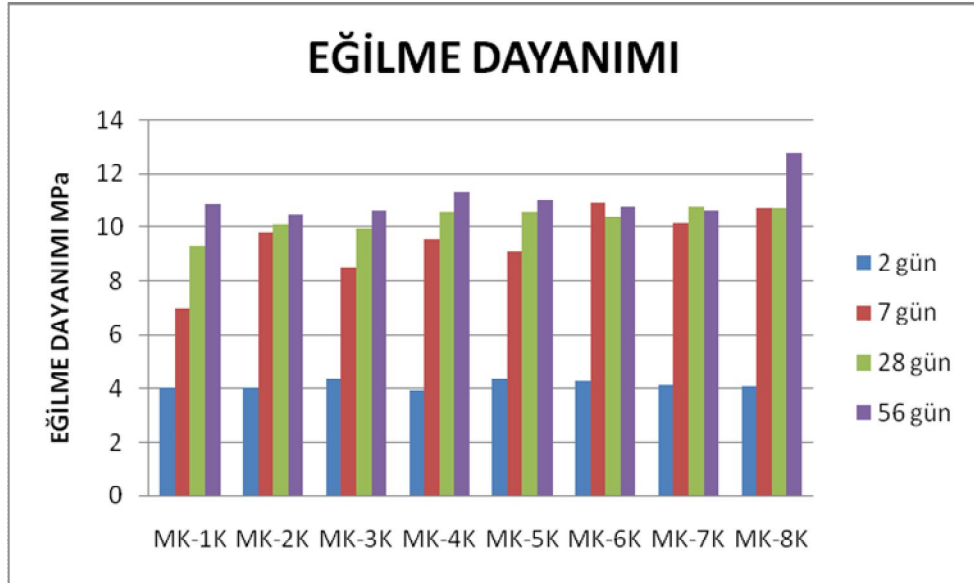
Tablo 8.11 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan prizmatik harç örneklerinin eğilme dayanımları (MPa).

Karışım Adı	Eğilme Dayanımları, MPa			
	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün
MK-1K	4.02	7.01	9.29	10.88
MK-2K	4.04	9.79	10.1	10.48
MK-3K	4.39	8.53	9.93	10.66
MK-4K	3.95	9.53	10.59	11.31
MK-5K	4.38	9.13	10.6	11.03
MK-6K	4.28	10.93	10.37	10.76
MK-7K	4.13	10.12	10.8	10.63
MK-8K	4.07	10.74	10.73	12.78

Şekil 8.38 ve 8.39’ da süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin eğilme dayanımları verilmiştir. Tüm karışımlar genel olarak düzenli bir artış sergilemişlerdir. 2. günde en yüksek eğilme dayanımı değeri %5 MK ikame edilen MK-3K karışımına ait iken, 7. gün de en yüksek eğilme dayanımını sağlayan karışım %12,5 MK içeren MK-6K isimli karışımdır. 28. gün MK-7K en yüksek eğilme değerini sağlarken 56. günde en yüksek performansı MK-8K karışımı göstermiştir.

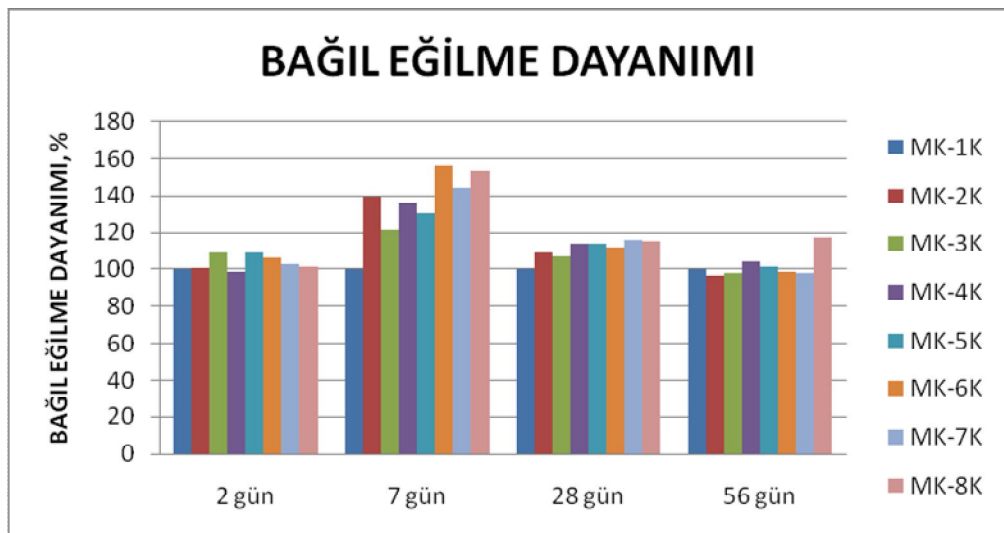


Şekil 8.38 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin yaşlarına göre eğilme dayanımları.



Şekil 8.39 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin eğilme dayanımları.

Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin bağıl eğilme dayanımı değerleri Şekil 8.40' da verilmiştir. Hazırlanan bu grafiklere göre MK-4K, MK-5K ve MK-8K dışındaki örneklerin 56. gün eğilme dayanımı değerleri kontrol dayanımının altında kalmıştır. 7. günde MK-6K ve MK-8K karışımları kontrol örneğini %60 oranında geçmeyi başarmıştır.



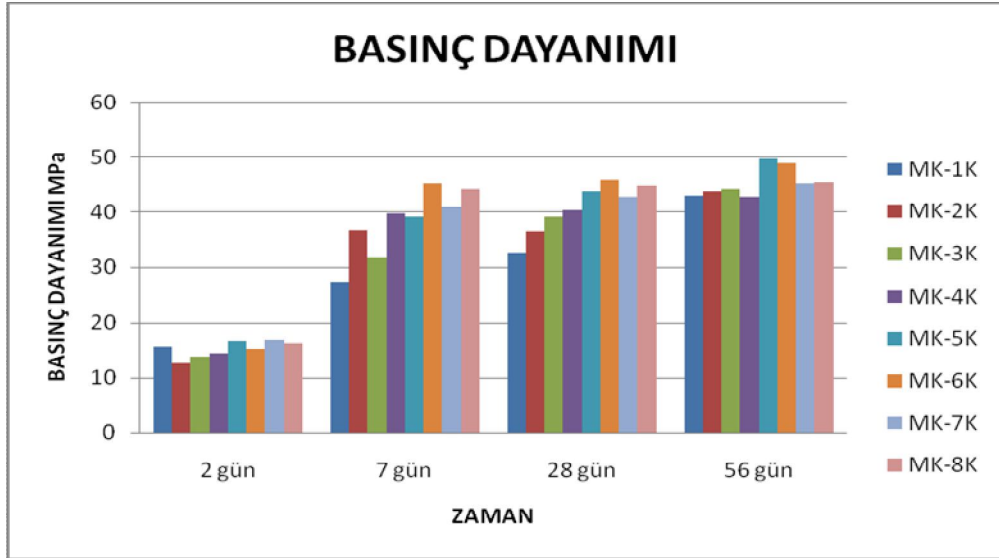
Şekil 8.40 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin bağıl eğilme dayanımları.

Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin bağıl eğilme dayanımı değerleri Şekil 8.40' ta verilmiştir. Hazırlanan bu grafiklere göre sadece 56. gün eğilme dayanımı değerleri kontrol dayanımının altında kalmıştır. 7. günde MK-6K ve MK-8K karışımları kontrol örneğini %60 oranında geçmeyi başarmıştır.

Tablo 8.12' de süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımı değerleri yer almaktadır.

Tablo 8.12 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımları (MPa).

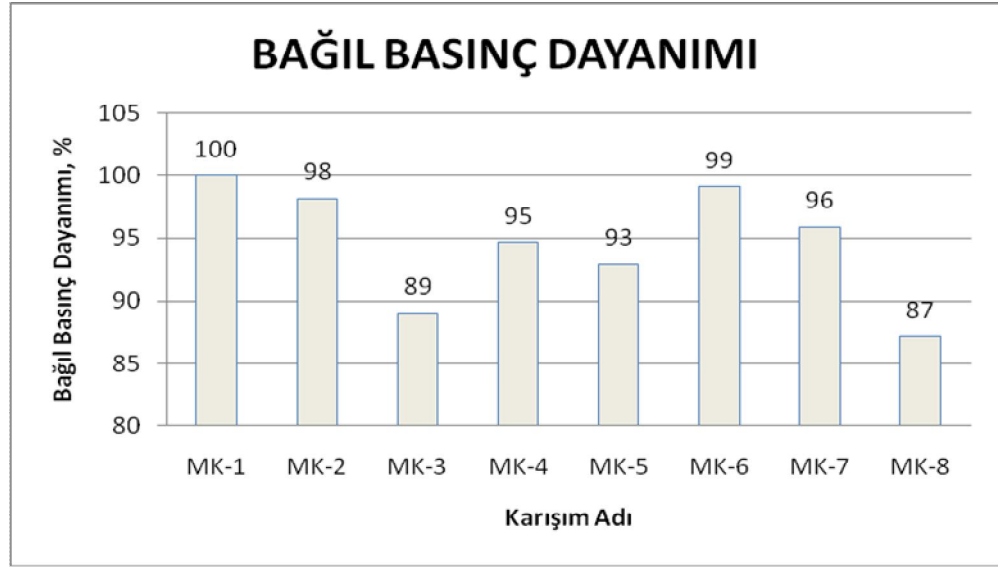
Karışım Adı	Basınç Dayanımları, MPa			
	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün
MK-1K	15.68	27.29	32.58	43
MK-2K	12.78	36.82	36.55	43.87
MK-3K	13.99	31.89	39.13	44.16
MK-4K	14.62	39.71	40.35	42.77
MK-5K	16.84	39.11	43.86	49.74
MK-6K	15.44	45.35	45.95	49.03
MK-7K	16.99	40.95	42.78	45.35
MK-8K	16.41	44.31	44.88	45.54



Şekil 8.41 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin yaşlarına göre basınç dayanımı değerleri.

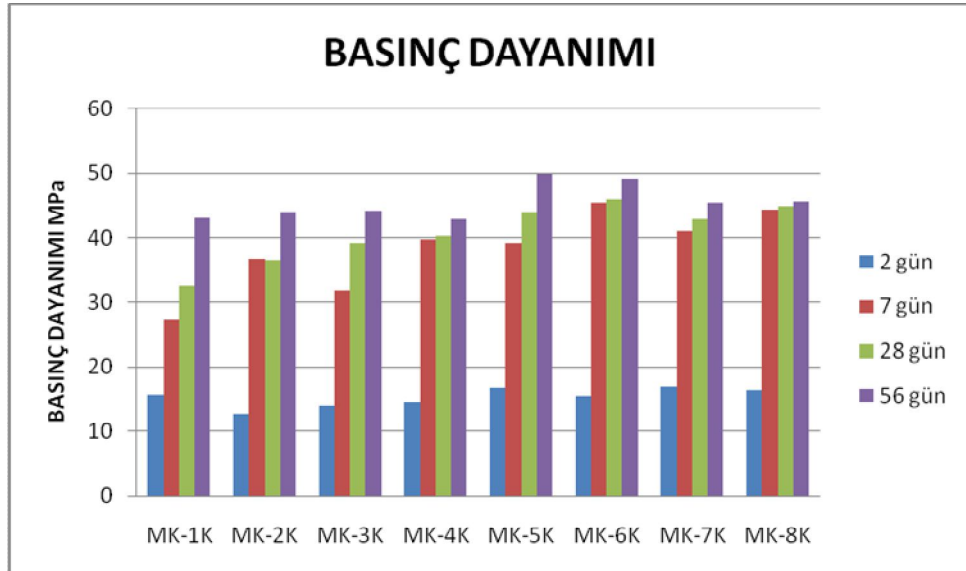
Şekil 8.41’ de süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin yaşlarına göre basınç dayanımı değerleri yer almaktadır. Yapılan çalışmaya göre harçların yaşı ilerledikçe basınç dayanımları artış göstermiştir. 2. günde en iyi sonucu %15 MK içeren MK-7K verirken, 7., 28. ve 56. günlerde en iyi dayanım gösteren karışım MK-6K olmuştur.

Şekil 8.42’ de I. grup örneklerin basınç dayanımı değerleri kontrol örneğinin basınç dayanımı ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 8.42 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin 56. gün basınç dayanımı değerlerinin kontrol örneğinin dayanımı ile karşılaştırılması.

Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin yaşlarına göre basınç dayanımı değerleri Şekil 8.43' de verilmektedir

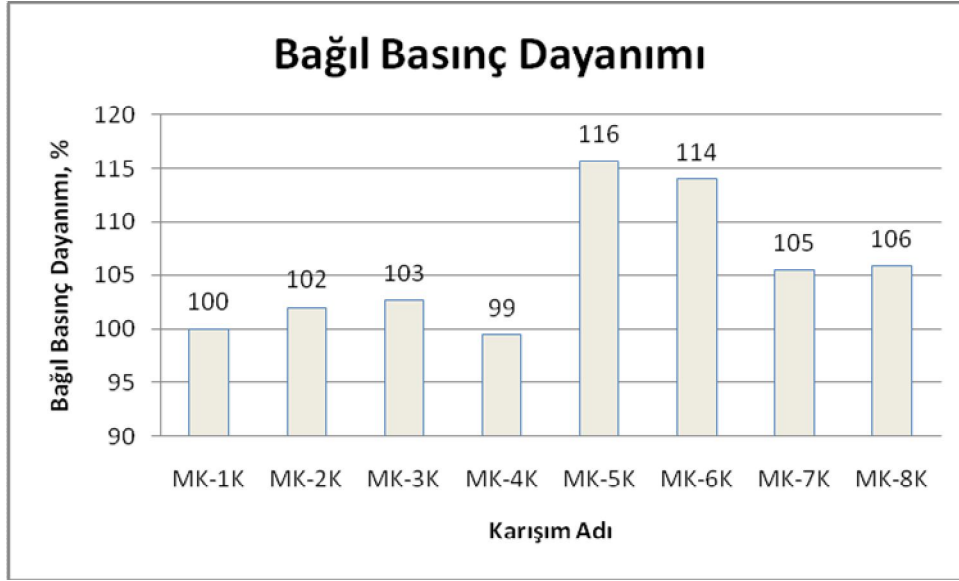


Şekil 8.43 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımı

. Tüm karışım oranları kendilerinden beklenen şekilde zamana bağlı olarak artış göstermişlerdir. Şekil 8.43' e bakıldığında en iyi dayanım değerlerini sağlayan

karışımların %10 MK oranında içeren MK-5K ve %12,5 oranında MK içeren MK-6K olduğu söylenebilir.

Şekil 8.44' de II. grup örneklerin 56. gün dayanım değerleri bağıl olarak verilmiştir.



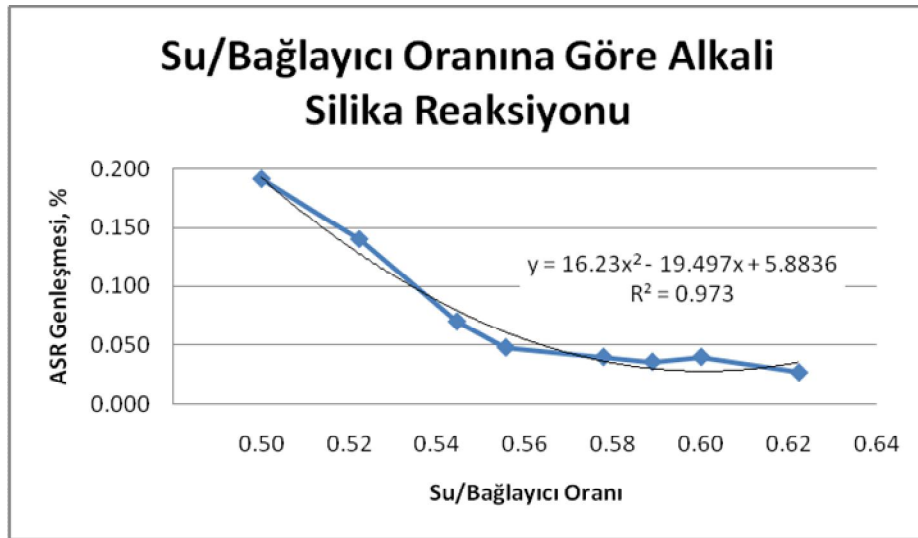
Şekil 8.44 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımı değerlerinin kontrol örneği ile karşılaştırılması.

Şekil 8.44' de II. grup örneklerin bağıl basınç dayanımları verilmiştir. Buna göre tüm karışımlarda kontrol karışımına göre artış gözlenmiştir. Ancak en yüksek artış %10 MK içeren örneklerde sağlanmıştır.

8.2. Deney Sonuçlarının Su/Bağlayıcı Oranı İlişkisi

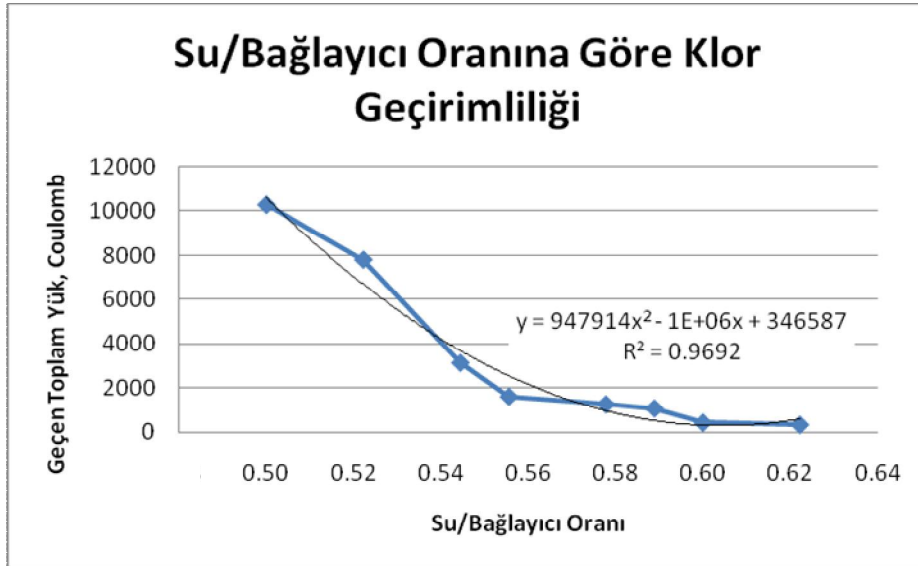
Yapılan deneysel çalışmada farklı su/bağlayıcı oranı ile hazırlanan I. grup örneklerin GEO deneyi sonuçları Şekil 8.45 te verilmiştir.

Şekil 8.46' da I. grup örneklerin ASR- su/bağlayıcı oranı ilişkisi verilmiştir.



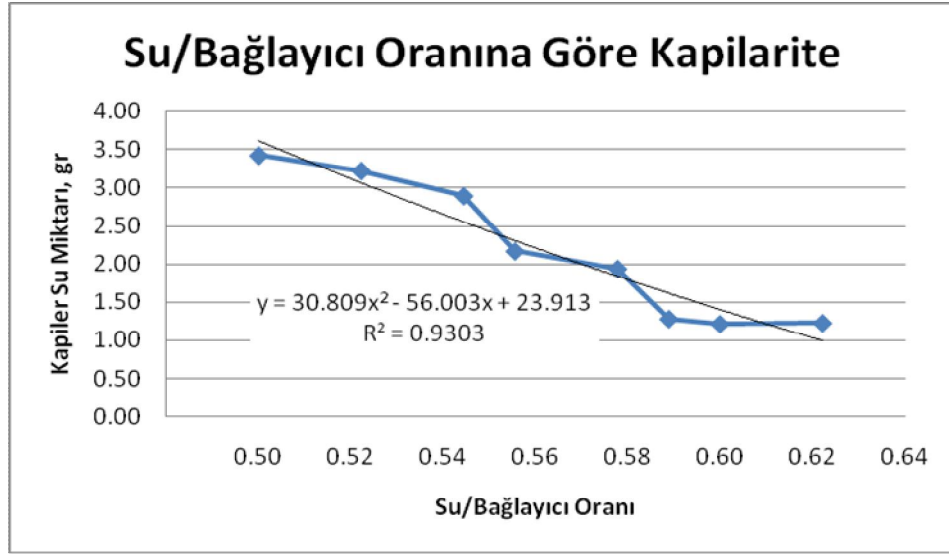
Şekil 8.46 I. grup örneklerin ASR değerlerinin su/bağlayıcı oranı ile ilişkisi.

I. grup örneklerin su/bağlayıcı oranı ile klor geçirimliliği değerlerinin karşılaştırılması Şekil 8.47' de verilmiştir.



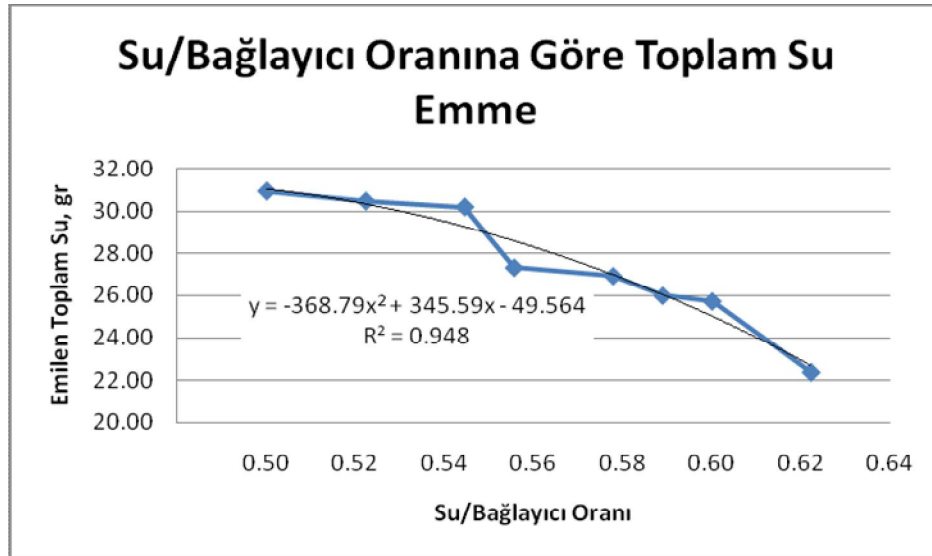
Şekil 8.47 I. grup örneklerin klor geçirimliliği değerlerinin su/bağlayıcı oranı ile ilişkisi.

Şekil 8.48' de I. grup örneklerin kapiler su emme- su/bağlayıcı oranı ilişkisi şematize edilmiştir.



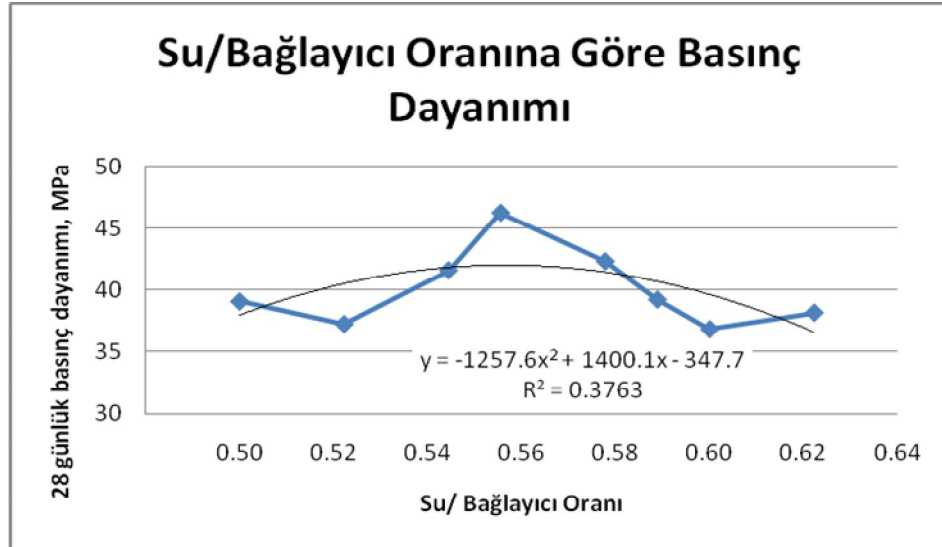
Şekil 8.48 I. grup örneklerin su/bağlayıcı oranı- kapiler su emme ilişkisi.

Şekil 8.49’ da süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin su/bağlayıcı oranı- toplam su emme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 8.49 I. grup örneklerin su/bağlayıcı oranı- toplam su emme ilişkisi.

Şekil 8.50’ de I. grup örneklerin su/bağlayıcı oranı- basınç dayanımı ilişkisi verilmiştir.



Şekil 8.50 I. grup örneklerin su/bağlayıcı oranı- basınç dayanımı ilişkisi.

8.3 Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda;

- Metakaolin kullanımının bazı durabilite özelliklerini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Kimyasal katkı olarak kullanılan süperakışkanlaştırıcı yüksek ikame oranlı karışımlarda işlenebilirliği arttırdığından örneklerin boşluk yapısı ve buna bağlı olarak dayanım ve geçirimsizlik özellikleri üzerinde olumlu etki yaratmıştır.
- Buhar küreine tabi tutulan GEO örneklerinde MK kullanımı genleşme değerlerinin önemli ölçüde düşmesine sebep olmuştur. Prefabrik sektöründe ve servis ömrü boyunca yüksek sıcaklık ve nem ortamında bulunan örneklerde %12,5 ve üzerindeki oranlarda metakaolin kullanımı GEO riskini azaltmaktadır. Kılcal boşluk yapısı ve iri boşluk yoğunluğu GEO' nda en kritik parametrelerdendir. Geniş bağlantılı kılcal boşluk ile yoğun boşluk yapısı top etrenjit oluşumunu tetiklemekte ve nihayetinde genleşme riski azalmaktadır. Ancak, dar bağlantılı ve çok miktardaki dar

kılcal boşluk, etrenjitin yer bulamamasından dolayı, masife dönüşmesine yol açarak genleşme riskini arttırmaktadır (Tosun, 2007). Harçlarda GEO genleşmesi için belirlenmiş bir sınır değer olmadığından karşılaştırma kontrol örnekleri ile yapılmıştır. Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerden sadece %2,5 ikame oranına sahip karışım kontrol genleşmesinin üstüne çıkmıştır.

- Metakaolin ikamesinin ASR riskini azalttığı deney sonuçlarından gözlenmiştir. Metakaolin katkılı çimento hamurları daha fazla ince gözenek taşımakta ve toplam gözeneklilik de bu sayede artmaktadır. 7 gün gibi kısa bir sürede boşluklar arasındaki devamlılık azalmakta, dolayısıyla hamurun geçirimliliği de azalmaktadır. Bu sayede, alkali reaktivitesi yüksek olan agregaların nemi emmesi de engellenmektedir. Süperakışkanlaştırıcı katkılı karışımlarda en düşük metakaolin katkıları için bile yüksek ASR direnci elde edilmiştir.
- Hızlandırılmış klor geçirimliliği deneyinde metakaolin ikamesinin artan oranları örneklerden geçen elektriksel yükün azalmasına sebep olmuştur. Süperakışkanlaştırıcı kullanılan (su/bağlayıcı oranı düşük) karışımlarda elde edilen klor geçirimliliğine karşı direnç daha yüksektir. Ancak en yüksek ikame değerinde bile geçirimlilik değeri ihmal edilebilir sınır olan 100 Coulomb' un üstündedir.
- Kapilarite deneyinde MK oranının artması kapiler su emme miktarını azaltmıştır. Ayrıca toplam su emme deneyinde de mineral katkı oranının artması emilen toplam su miktarını azaltmıştır. Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılan örneklerde diğer örneklere göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.
- Metakaolin ikame edilmesi basınç ve eğilme dayanımı değerlerini olumlu yönde etkilemiştir. Su/bağlayıcı oranı değişken olan örneklerde dayanım

değerleri süperakışkanlaştırıcı kullanılan örneklerle göre daha düşük değerlerdedir. Her yaş için en iyi basınç dayanımı değeri %7,5 oranında metakaolin içeren MK-4 karışımında elde edilmiştir.

8.4 Öneriler

- Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan karışım oranları çok sık olduğundan oranlar arasında daha büyük aralıklar olmalıdır. Böylece meydana gelen değişimler daha iyi saptanabilecektir.
- Gecikmiş etrenjit oluşumu deneyinde kullanılan Duggan yöntemi kısa süreli bir deneysel çalışmayı uygun görmektedir. Ancak araştırmacıların bulguları neticesinde bu sürenin yetersiz olduğu saptanmıştır. Örneklerin en az 1 yıl kirece doymun suda bekletilmesi gerekmektedir. Yapılan deneysel çalışmada kür koşulları bozulduğundan, daha sonra yapılacak çalışmalarda kür koşullarına sadık kalınarak araştırılmanın yapılması önerilmektedir.
- Gecikmiş etrenjit oluşumu ve alkali silika reaksiyonu deneylerinde örneklerin iç yapısı fotoğraflanarak, genleşmelerin esas nedenleri ve oluşan reaksiyon ürünleri saptanabilir.
- Basınç dayanımı deneyinde 2, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri incelenmiştir. Daha ileri yaşlar incelenebilir ve MK' nın ileri yaşlardaki etkinliği gözlenebilir.

KAYNAKLAR

- Acquaye, L. (2006). *Effect of high curing temperatures on the strength, durability and potential of delayed ettringite formation in mass concrete structures*. Florida: University of Florida, PhD Thesis.
- Akman, S. (2003). Gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF). *Beşinci Ulusal Beton Kongresi (Betonun Dayanıklılığı) Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 9-15.
- Arjunan, P. (2000). *Detailed characterization of current North American Portland cements and clinkers and the implications for the durability of modern concrete*. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, Ph.D. Thesis.
- ASTM C1260. (2002). *Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates*. West Conshohocken: ASTM International, Annual Book of ASTM Standards.
- Azzam, A., E. (2002). *Delayed ettringite formation, the influence of aggregate types, curing conditions, exposure conditions, alkali content, fly ash, and mix water conditioner (MWC)*. Maryland: University of Maryland, College Park, Ph.D. Thesis.
- Bai, J., Wild, S. ve Sab_r, B.B. (2003). Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater. *Cement and Concrete Research*, 33, 353–362.
- Baradan, B. (2003). *İnşaat Mühendisleri İçin Malzeme Bilgisi*. D.E.Ü. Müh. Fak.Yayın No. 307, 394 s.
- Baradan, B. (2004). *Yapı Malzemesi II.* . D.E.Ü. Müh. Fak. Yayın No. 207, 221 s.
- Baradan, B., Yaz_c_, H. ve Ün, H (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. D.E.Ü. Müh. Fak. Yay_n No. 298, 282 s.

- Baradan, B., Tosun K., Felekoğlu B. ve Altun A. (2005). Portland kalkerli çimento üretiminde mekanik performans ve durabilite özellikleri açısından optimum kalker oranının belirlenmesi. Tübitak Araştırma Projesi MAG 104I083, 2005- devam ediyor.
- Barbarulo, R., Peycelon, H., Prene, S. ve Marchand, J. (2005). Delayed ettringite formation symptoms on mortars induced by high temperature due to cement heat of hydration or late thermal cycle. *Cement and Concrete Research*, 35, (1), 125-131.
- Ceesay, J. (2004). The influence of exposure conditions on delayed ettringite formation in mortar specimens. Maryland: University of Maryland College Park, M.S. Thesis.
- Cohen, M. D. (1983). Theories of expansion in sulfoaluminate - type expansive cements: Schools of thought. *Cement and Concrete Research*, 13, (6), 809-818.
- Collepari, M. (1997). A Holistic Approach to Concrete Damage Induced by Delayed Ettringite Formation. *Proceedings of the Mario Collepari Symposium on Advances in Concrete Science and Tecnology*, Rome, 8 October, 373-396
- Day, R. L. (1992). The effect of secondary ettringite formation on the durability of concrete: A literature analysis. *Research and development bulletin RD108T*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 115p.
- Diamond, S. (1996). Delayed ettringite formation - Processes and problems. *Cement and Concrete Composites*, 18, (3), 205-215.
- Diamond, S. (2000). The relevance of laboratory studies on delayed ettringite formation to DEF in field concretes. Communication. *Cement and Concrete Research*, 30, (12), 1987- 1991.

- Diamond, S. (2004). The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer. *Cement and Concrete Composites*, 26, (8), 919-933.
- Divet, L. ve Randriambololona, R. (1998). Delayed Ettringite Formation: The Effect of temperature and basicity on the interaction of sulphate and C-S-H phase. *Cement and Concrete Research*, 28, (3), 357-363.
- Divet, L., Pavoine, A. (2004). Delayed ettringite formation in massive concrete structures: an account of some studies of degraded bridges. *International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*. Rilem Publications SARL, 98-126.
- Ekolu, S. O. (2004). *Role of heat curing in concrete durability: Effects of lithium salts and chloride ingress on delayed ettringite formation*. Toronto (Canada): University of Toronto, Ph.D.Thesis.
- Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim Yayınları, Ankara.
- Erten, E. (2009). Deniz suyunun çimento tipi farklı harçların mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi, DEÜ, Yüksek Lisans Tezi.
- Fu, Y. (1996). Delayed ettringite formation in Portland cement products. Ottawa: University of Ottawa, Ph.D. Thesis.
- Fu, Y. ve Beaudoin J. J. (1996b). Microcracking as a precursor to delayed ettringite formation in cement systems. *Cement and Concrete Research*, 26, (10), 1493-1498.
- Fu, Y. ve Beaudoin, J. J. (1996a). On the distinction between delayed and secondary ettringite formation in concrete. Correspondence. *Cement and Concrete Research*, 26, (6), 979-980.

- Goto, S. ve Roy, D. M. (1981). The effect of w/c ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*, 11, (4), 575-579.
- Grabowski, E. Czarnecki, B., Gillott, J. E., Duggan, C. R. and Scott, J. F. (1992). Rapid test of concrete expansivity due to internal sulfate attack. *ACI Materials Journal*, 89, (5), 469-480.
- Heinz, D. ve Ludwig, U. (1987). Mechanism of secondary ettringite formation in mortars and concrete subjected to heat treatment. SP100-105, In: Mather, K. B., Concrete Durability, Detroit, 2059-2071.
- Herfort, D. (2004). Distribution of sulfates in Portland cement clinker. *International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*. Rilem Publications SARL, 18-27.
- Hill, J., Byars, E. A., Sharp, J. H., Lynsdale, C. J., Cripps, J. C., Zhou, Q., Heinz, D., Ludwig, U. (2003). An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete. *Cement and Concrete Composites* 25, (8), 997-1003.
- Hobbs, D.W. (1988). Alkali silica reaction in concrete. Thomas Telford Ltd, London
- Idorn G. M. (1992). Expansive mechanisms in concrete. *Cement and Concrete Research*, 22, (6), 1039-1046.
- Kelham, S. (1996). The Effect of Cement Composition and Fineness on Expansion Associated with Delayed Ettringite Formation. *Cement and Concrete Composites*, 18, (3), 171-179.
- Kelham, S. (2004). Effects of cement parameters on expansion associated with DEF. *International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*. Rilem Publications SARL, 197-211.

- Kjellsen, K. O., Detwiler, R. J. ve O. E. Gjrv. (1990). Backscattered electron imaging of cement pastes hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 20, (2), 308-311.
- Kjellsen, K. O., Detwiler, R. J. ve Gjrv, O. E. (1991). Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 21, (1), 179-189.
- Kurdowski, W. (2002). Role of delayed release of sulphates from clinker in DEF. *Cement and Concrete Research*, 32, (3), 401-407.
- Lane, D. S. ve Ozyildirim, H. C. (1999). Evaluation of the potential for Internal Sulfate Attack Through Adaptation of ASTM C342 and the Duggan Test. *Cement, Concrete and Aggregates*, 21, (1), 43-58.
- Lawrence, B. L., Moody, E. D., Guillemette, R. N. ve Carrasquillo, R. L. (1999). Evaluation and mitigating for premature concrete distress in Texas department of transportation concrete elements. *Cement, Concrete and Aggregates*, 21, (1), 73-81.
- Lawrence, C. D. (1995a). Delayed Ettringite Formation: An Issue? *Materials Science of Concrete Vol. IV*, American Ceramic Society, Ohio, USA, 113–154.
- Lawrence, C. D. (1995b). Mortar expansions due to delayed ettringite formation. Effects of curing period and temperature. *Cement and Concrete Research*, 25, (4), 903-914.
- Lee, H., Cody, R. D., Cody, A. M. ve Spry, P. G. (2005). The formation and role of ettringite in Iowa highway concrete deterioration. *Cement and Concrete Research*, 35, (2), 332-343.
- Mehta, P. K. (1983). Mechanism of sulfate attack on Portland cement concrete- Another look. *Cement and Concrete Research*, 13, (3), 401-406.

- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2005). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. <http://site.ebrary.com/lib/deulibrary>.
- Michaud, V. ve Suderman, R. W. (1999). Anhydrite in high sulfur trioxide (SO₃)/Alkali clinkers: dissolution kinetics and influence on concrete durability. *Cement, Concrete and Aggregates*, 21, (1), 196-201.
- Michaud-P. V., Suderman, R. W. (2004). Sulfates in high SO₃/alkali clinker. Their dissolution kinetics and their influence on concrete workability and durability. *International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*. Rilem Publications SARL, 28-40.
- Neville, A.M. (1997), *Properties of Concrete*.
- Odler, I. ve Chen, Y. (1996). On the delayed expansion of heat cured Portland cement pastes and concretes, *Cement and Concrete Composites*, 18, (3), 181-185.
- Ozol, M. A., Strand, W. (1999). Delayed ettringite formation at Brewer Stadium, Bone, North Carolina. *Cement, Concrete and Aggregates*, 21, (1), 24-34.
- Pavoine, A. ve Divet, L. (2003). Delayed ettringite formation in concrete: Tests based on drying and wetting cycles. *6th CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete*, Thessaloniki, 989-1004.
- Pavoine, A., Divet, L., Fenouillet, S. (2006a). A concrete performance test for delayed ettringite formation: Part I optimisation. *Cement and Concrete Research*, 36, (12), 2138-2143.
- Pavoine, A., Divet, L., Fenouillet, S. (2006b). A concrete performance test for delayed ettringite formation: Part II validation. *Cement and Concrete Research*, 36, (12), 2144-2151.

- Petrov, N. ve Tagnit-Hamou, A. (2004). Is microcracking really a precursor to delayed ettringite formation and consequent expansion, *ACI Materials Journal*, 101, (6), 442-447.
- Ramadan, E. O. (2000). *Experimental and theoretical study of delayed ettringite damage in concrete*. Maryland: University of Maryland College Park, Ph.D. Thesis, 264 p.
- Ramlochan, T., Thomas, M. D. A., Hooton, R. D. (2003). The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature, Part I: Expansive behaviour. *Cement and Concrete Research*, 33, (6), 807-814.
- Ramlochan, T., Thomas, M. D. A., Hooton, R. D. (2004). The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature, Part II: Microstructural and microchemical investigations. *Cement and Concrete Research*, 34, (8), 1341-1356.
- Ramyar, K ve Andiç, Ö. (2002). Uçucu kül inceliği ve kullanım oranının alkali silis reaksiyonuna etkisi.
- Scrivener, K. L., Damidot, D. ve Famy, C. (1999). Possible mechanism of expansion of concrete exposed to elevated temperatures during curing (also known as DEF) and implications for avoidance of field problems. *Cement, Concrete and Aggregates*, 21, (1), 93-101.
- Shayan, A. ve Ivanusec, I. (1996). An experimental clarification of the association of delayed ettringite formation with alkali-aggregate reaction, *Cement and Concrete Composites*, 18, (3), 161-170.
- Shayan, A. ve Quick, G. W. (1991). Relative Importance of Deleterious Reactions in Concrete: Formation of Alkali-Aggregate Reactivity Products and Secondary Ettringite. *Advances in Cement Research*, 4, (16), 149-157.

- Shayan, A. ve Quick, G. W. (1992). Microscopic features of cracked and uncracked concrete railway sleepers. *ACI Materials Journal*, 89, (4), 348-361.
- Shimada, Y. (2005). Chemical Path of Ettringite Formation in Heat-cured Mortar and Its Relationship to Expansion. Illinois: Northwestern University, Evanston, PhD thesis.
- Skalny, J. ve Locher, F. W. (1999). Curing practices and internal sulfate attack - the European experience. *Cement, Concrete and Aggregates*, 21, (1), 59-63.
- Skalny, J., Marchand, J. ve Odler I. (2003). *Sulfate attack on concrete*. London; New York: Spon Press, Taylor & Francis e-Library.
- Stark, J. ve Bollmann, K. (1999). Delayed Ettringite Formation in Concrete. Bauhaus University Weimar/Germany, Nordic Concrete Research, <http://www.itn.is/ncr/publications/doc-23-2.pdf>
- Stark, J. ve Bollmann, K. (2000). Late ettringite formation in concrete, Part 1. *ZKG International*, 53, (4), 232-240.
- Stark, J. ve Bollmann, K. (2000). Late ettringite formation in concrete, Part 2. *ZKG International*, 53, (5), 298-309.
- Stark, J., Bollmann, K., ve Seyfarth, K. (1998). Ettringite – Cause of Damage, Damage Intensifier or Uninvolved Third Party?" *ZKG International*, 51, (5), 280-292.
- Stark, J., Ludwig, H.-M., ve Müller, A. (1993). Hydrate Phase Changes at Low Temperatures. *ZKG International*, 46, (2), 90-94.
- Swamy, R.N. (1992). The alkali silica reaction in concrete, Van Nostrand, Reinhold.

- Şengül, Ö. ve Gjörv, O. E. (2005). Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun betonda klor iyonu yayılımına etkisi. 6. *Ulusal Beton Kongresi. Yüksek Performanslı Betonlar. Bildiriler Kitabı*. Göksu Matbaası.
- Tagnit-Hamou A. ve Nikola Petrov. (2004). A new method for evaluating the risk of DEF. *Cement, Concrete and Aggregates*, 26, (2), 52-57.
- Taylor, H. F. W. (2004). Sulfates in Portland clinker and cement. *International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation. Rilem Publications SARL*, 3-17.
- Taylor, H. F. W. (1999). Distribution of sulfate between phases in Portland cement clinkers. *Cement and Concrete Research*, 29, (8), 1173-1179.
- Tennis, P. D., Bhattacharja, S., Klemm, W. A. ve Miller, F. M. (1999). Assessing the distribution of sulfate in Portland cement and clinker and its influence on expansion in mortar. *Cement, Concrete and Aggregates*, 21, (2), 212-216.
- Thaulow, N., Jakobsen, U. H. ve Clark, B. (1996). Composition of alkali silica gel and ettringite in concrete railroad ties: SEM-EDX and X-ray diffraction analyses. *Cement and Concrete Research*, 26, (2), 309-318.
- Thomas, M. D. A. ve Ramlochan, T. (2004). Field cases of delayed ettringite formation. *International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation. Rilem Publications SARL*, 85-97.
- Tosun, K. (2007). Farklı çimento tiplerinin gecikmiş etrenjit oluşumu üzerine etkileri, DEÜ, Doktora Tezi.
- Tosun, K., Yazıcı, H., Yiğiter, H. ve Baradan, B. (2003). Uçucu kül içeren çimento harçlarının sülfat dayanıklılığının incelenmesi. 5. *Ulusal Beton Kongresi. Bildiriler Kitabı*. Alaş Matbaası.

TS EN 196–1/Mart 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım

TS EN 196–2/Mart 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi

TS EN 196–21/Mart 2002. Çimento Deney Metotları- Çimentoda Klorür, Karbon Dioksit ve Alkali Muhtevası Tayini

TS EN 206–1/Nisan 2002. Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalât ve uygunluk.

Yan, P., Qin, X., Yang, W. ve Peng, J. (2001). The semiquantitative determination and morphology of ettringite in pastes containing expansive agent cured in elevated temperature. *Cement and Concrete Research*, 31, (9), 1285-1290.

Yang, R., Lynsdale, C. J. ve Sharp, J. H. (2002). Discussion. Reply to the discussion by Hime, W. of the ‘‘Reply to the discussion by Chatterji, S. of the paper: Delayed ettringite formation in heat-cured Portland cement mortars’’. *Cement and Concrete Research*, 32, (...) 993-994.

Yang, R., Sharp, J. H. (2001a). Hydration characteristics of Portland cement after heat curing: I , Degree of hydration of the anhydrous cement phases. *J. Am. Ceram Soc.* 84, (3), 608-14, 2001.

Zacarias, P. de S. (2002). The suppression of expansion in heat-cured mortars by fly ash and other additives. Toronto (Canada): University of Toronto, M.S. Thesis, 286 p.

Zhang, Z. (1999). *Delayed ettringite formation in heat cured cementitious systems*. West Lafayette (USA): Purdue University, Ph.D. Thesis, 237 p.

EKLER

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1 GEO kaynaklı genişleme riskini belirleyen iç ve dış faktörler.....	31
Tablo 3.2 Farklı SO₃ kaynakları ve bu kaynaklardan çimentoya katılan SO₃'ün özellikleri	32
Tablo 3.3 Fu ve diğerleri tarafından kullanılan kumların tane boyut dağılımları.....	40
Tablo 3.4 Fu (1996)' nin kullandığı çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	53
Tablo 4.1 Alkali silika jelinin kimyasal analizi.....	77
Tablo 7.1 I. grup harç karışımlarının karışım oranları ve dökülen örnek sayıları....	116
Tablo 7.2 II. grup harç karışımlarının karışım oranları ve dökülen örnek sayıları..	116
Tablo 7.3 CEM I 42,5R çimentosunun kimyasal özellikleri.....	117
Tablo 7.4 CEM I 42,5R çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	118
Tablo. 7.5 CEM I 42,5 R çimentosunun klinker analizi	118
Tablo 7.6 Kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri.....	119
Tablo 7.7 Şehir şebeke suyunun kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri.....	120
Tablo 7.8 Metakaolinin özellikleri	120
Tablo 7.9 Sikament FFN süperakışkanlaştırıcı sıvı katkının bazı teknik özellikleri.....	121
Tablo 7.10 Hazırlanan I. grup karışımların dozajı (1m ³ karışımda bulunan malzeme miktarları, kg).....	121
Tablo 7.11 Hazırlanan II. grup karışımların dozajı	122

Tablo 7.12 Klor geçirgenliği değerlendirme kriterleri.....	129
Tablo 8.1 GEO deneyinde kullanılan I. grup karışım numunelerinin boy değişimi.....	134
Tablo 8.2 GEO deneyinde kullanılan II. grup numunelerin 56. gđn sonunda boy değişimi.....	138
Tablo 8.3 Klor geçirimliliği deneyi için sđperakışkanlařtırıcı kullanmadan hazırlanan örneklerden 6 saat sonunda geçen elektrik akımı.....	145
Tablo 8.4 Sđperakışkanlařtırıcı kullanılarak hazırlanan klor geçirimliliği örneklerinden deney sonunda geçen toplam yük.....	147
Tablo 8.5 Kapiler su emme deneyi için sđperakışkanlařtırıcı kullanılmadan hazırlanan ve 28 gđn kirece doygun suda bekletilen örneklerin ağırlık değişimleri ve kapilarite katsayısı	150
Tablo 8.6 Kapiler su emme deneyi için sđperakışkanlařtırıcı kullanılarak hazırlanan ve 28 gđn kirece doygun suda bekletilen örneklerin ağırlık değişimleri (gram cinsinden) ve kapilarite katsayısı.....	152
Tablo 8.7 I. grup örneklerin toplam su emme değerleri	154
Tablo 8.8 II. grup örneklerin toplam su emme değerleri	154
Tablo 8.9 Sđperakışkanlařtırıcı kullanılmadan hazırlanan prizmatik harç örneklerinin eğilme dayanımları (MPa).....	157
Tablo 8.10 Sđperakışkanlařtırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin basınç dayanımları (MPa)	160
Tablo 8.11 Sđperakışkanlařtırıcı kullanılarak hazırlanan prizmatik harç örneklerinin eğilme dayanımları (MPa).....	161
Tablo 8.12 Sđperakışkanlařtırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımları (MPa)	164
Tablo 7.12 Klor geçirgenliği değerlendirme kriterleri.....	129

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Betonun ve çimento harcının fiziksel nedenlerle bozulması	2
Şekil 1.2 Betonun ve çimento harcının bozulmasına yol açan kimyasal reaksiyon	4
Şekil 2.1 Kaolin kili ve metakaolinin tipik XRD analizleri	8
Şekil 2.2 Metakaolinin 1000 ve 5000 kat büyütmedeki mikro-fotoğrafları.....	9
Şekil 3.1 Hasar görmemiş travers ve görmüş traversler	17
Şekli 3.2 Sekiz yıllık bir yer altı otoparkı merdiveni prefabrik panel elemanında GEO kaynaklı hasar	19
Şekil 3.3 İlk incelemelerde genişlemenin kaynağı olarak yorumlanan agrega çimento hamuru arayüzeyinde sonradan biriken ikincil etrenjit yapısı.....	20
Şekil 3.4 Öngerilmeli köprü kirişlerinde ASR ve GEO' nun birlikte meydana getirdiği hasar	21
Şekil 3.5 Texas kirişleri ilk inceleme grubunun mikroyapısal inceleme mikrografi.....	22
Şekil 3.6 Texas kirişleri ikinci inceleme grubunun mikroyapı inceleme mikrografi.....	23
Şekil 3.7 Fransa'da betonarme köprü başlığında meydana gelen hasar	26
Şekil 3.8 Texas'ta aydınlatma direği temelinde ASR ve GEO hasarı	26
Şekil 3.9 Donma çözülme etkisi sırasında oluşan etrenjitin boşluklara birikimi ve boşluk hacmini azaltması	27
Şekil 3.10 Buhar kürü geçirmiş örneklerde GEO'nun genişletme mekanizması.....	28
Şekil 3.11 Farklı morfolojik formlara sahip etrenjit kristalleri	30

Şekil 3.12 Farklı morfolojik formlara sahip etrenjit kristalleri	31
Şekil 3.13 Buhar kürü görmüş örneklerin genişleme değerleri ile erken dayanımları arasındaki ilişki.....	32
Şekil 3.14 Buhar kürü sonrası genişleme ile çimentonun C_3A içeriği arasındaki ilişki.....	35
Şekil 3.15 Buhar kürü işleminden sonra çimento hamuru boşluk suyu SO_4 konsantrasyonunun farklı çimento kompozisyonları için değişimi	37
Şekil 3.16 Özgül yüzey alanı ile GEO kaynaklı genişleme arasındaki ilişki.....	38
Şekil 3.17 Agrega miktarının çimento harcı genişleme değerlerine etkileri.....	39
Şekil 3.18 Farklı tane boyut dağılımlarına sahip kumlarla hazırlanan harçların GEO kaynaklı genişleme değerleri.....	40
Şekil 3.19 Farklı agregalar kullanılarak hazırlanan çimento harçlarının genişleme değerleri.....	41
Şekil 3.20 Farklı kökenden mineral katkıların GEO kaynaklı genişlemeye etkileri	44
Şekil 3.21 Sade çimentolu ve %18 uçucu küllü örneklerin, buhar kürü sonrası 91 günlük taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	45
Şekil 3.22 Mineral katkıların GEO kaynaklı genişleme üzerindeki etkileri	45
Şekil 3.23 Wollastonit lifi kullanımının GEO kaynaklı genişlemeye etkisi	46
Şekil 3.24 Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde buhar kürü uygulamasının erken ve nihai dayanıma etkisi.....	47
Şekil 3.25 Farklı buhar kürü koşullarının beton geçirimsizliğine etkisi.....	48
Şekil 3.26 Ön bekleme süresinin GEO kaynaklı genişlemeye etkisi.....	49

Şekil 3.27 Güneş altında açıkta bırakılan beton panellerde beton ve hava sıcaklığı.....	50
Şekil 3.28 Buhar kürü sonrası ıslanma kuruma uygulamanın genişlemeye etkisi	53
Şekil 3.29 Buhar kürü (85°C) sonrası suda bekleyen örneklerin genişmeleri ile $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar oranları arasındaki ilişki.....	56
Şekil 3.30 GEO indeksi ile; a) 800 günlük ve b) 1400 günlük genişmeler arasındaki ilişkiler	56
Şekil 2.31 Duggan yönteminin şematik gösterimi.....	60
Şekil 3.32 Attiogbe yönteminin şematik gösterimi	61
Şekil 3.33 Fu yönteminin şematik gösterimi.....	62
Şekil 3.34Fu ve Kelham yöntemleri uygulanan farklı çimento harçlarının genişleme değerleri	63
Şekil 4.1 Demiryolu traversi ve bir betonarme binada oluşmuş ASR jelinin görünümü	67
Şekil 4.2 Reaksiyonda farklı koşullarda fiziksel ve kimyasal denge oluşumu	71
Şekil 4.3 Amerika’da Hoover barajında ASR nedeniyle oluşan çatlaklar.....	72
Şekil 4.4 ASR jelinin Ca içeriği ile şişme basıncı arasındaki ilişki	78
Şekil 4.5 ASR çatlaklarının modellenmesi	80
Şekil 4.6 Jel hacmi ile reaktif silika içeriği arasındaki ilişki.....	82
Şekil 4.7 ASR’ de gözlenen pesimum davranış	83
Şekil 5.1. Klor iyonlarının betona girişi.....	99
Şekil 5.2 Hızlandırılmış klor geçirimsizliği deneyi düzeneği	101
Şekil 7.1 Kullanılan agreganın (doğal kum) granülometri eğrisi.....	119

Şekil 7.2 GEO deneyinde kullanılan örneklerin adedi ve boyutları	122
Şekil 7.3 Buhar kürünün şematik olarak gösterimi	124
Şekil 7.4 ASR deneyi için hazırlanan örneklerin adedi ve boyutları.....	124
Şekil 7.5. ASR deneyi için kullanılan harç çubuğu kalıpları	126
Şekil 7.6 ASR harç çubuğu örneklerinin 80 ⁰ C sıcaklıkta NaOH çözeltisi içinde kür edilmesi ve boy değişimlerinin ölçülmesi.....	126
Şekil 7.7. Klor geçirimliliği deneyi için hazırlanan örneklerin adedi ve boyutları.....	127
Şekil 7.8 Klor Geçirimliliği deneyi düzeneği.....	128
Şekil 7.9 NaCl ve NaOH çözeltileri ve örneğin deneye hazırlanması.....	129
Şekil 7.10 Kapiler su emme deneyinde kullanılan örneklerin adedi ve boyutları.....	129
Şekil 7.11 Su emme deneyine bırakılan örneklerin tartılması.....	130
Şekil 7.12 Eğilme ve basınç dayanımı deneylerinde kullanılan örneklerin adedi ve boyutları	131
Şekil 7.13 Eğilmede çekme deneyi için kullanılan pres	132
Şekil 7.14 Basınç presi.....	133
Şekil 8.1 GEO deneyinde I. grup örneklerde 56 gün sonra ölçülen boy değişimi değerleri	135
Şekil 8.2 GEO deneyinde I. Grup buhar kürü görmüş örneklerde 56 gün sonra ölçülen bağıl boy değişimi değerleri	135
Şekil 8.3 GEO deneyinde I. grup örneklerde 21 ay sonra ölçülen boy değişimi değerleri	136
Şekil 8.4 GEO deneyinde buhar kürü görmüş I. grup örneklerde 21 ay sonra ölçülen bağıl boy değişimi değerleri	136

Şekil 8.5 GEO deneyinde buhar kürü görmüş I. grup örneklerde 56 gün ve 21 ay sonra ölçülen boy değişimi değerleri	137
Şekil 8.6 GEO deneyinde II. grup karışım örneklerinin 56 gün sonunda boy değişimi değerleri	138
Şekil 8.7 GEO deneyinde buhar kürü görmüş II. grup örneklerin 56 gün sonra ölçülen bağıl boy değişimi değerleri	139
Şekil 8.8 GEO deneyinde II. grup örneklerin 21 ay sonunda boy değişimi değerleri.....	139
Şekil 8.9 GEO deneyinde buhar kürü görmüş II. grup örneklerin 21 ay sonra ölçülen bağıl boy değişimi değerleri.	140
Şekil 8.10 GEO deneyinde buhar kürü görmüş II. grup örneklerde 56 gün ve 21 ay sonra ölçülen genleşme değerlerinin karşılaştırılması	140
Şekil 8.11 I. ve II. grup karışımların 56. gün genleşme değerlerinin karşılaştırılması... ..	141
Şekil 8.12 I. ve II. grup karışımların 21 ay sonunda elde edilen genleşme değerleri.....	142
Şekil 8.13 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan ASR örneklerinin hızlandırılmış deney yönteminden sonra genleşme değerleri.	143
Şekil 8.14 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan ASR örneklerinin hızlandırılmış deney yönteminden sonra genleşme değerleri	144
Şekil 8.15 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan ve kullanılarak hazırlanan harç çubuğu örneklerinin genleşmelerinin karşılaştırılması	144
Şekil 8.16 Klor geçirimsizliği deneyinde 30 dakika aralıkla kümülatif olarak ölçülen elektrik akımı değerlerinin katkı oranlarına göre sıralanması.....	146
Şekil 8.17 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerden 6 saat boyunca geçen toplam elektriksel yük	146

Şekil 8.18 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerden geçen elektriksel yükün kontrol karışımından geçen toplam elektriksel yük ile kıyaslanması.....	147
Şekil 8.19 Klor geçirimsizliği deneyinde 30 dakika aralıkla kümülatif olarak ölçülen elektrik akımı değerlerinin katkı oranlarına göre sıralanması.....	148
Şekil 8.20 Klor geçirimsizliği deneyinde 6 saat sonunda süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerden geçen toplam yük miktarları	148
Şekil 8.21 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerden geçen toplam yük miktarlarının kontrol örneği ile kıyaslanması	149
Şekil 8.22 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmamış ve kullanılan karışımlarla hazırlanan örneklerden geçen yüklerin karşılaştırılması.....	149
Şekil 8.23 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin kapilarite (kılcallık) katsayısı değerleri	151
Şekil 8.24 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin kapilarite katsayılarının kontrol örneği ile karşılaştırılması	151
Şekil 8.25 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin kapilarite (kılcallık) katsayısı değerleri	152
Şekil 8.26 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin kapilarite (kılcallık) katsayısı değerlerinin kontrol örneği ile karşılaştırılması.....	153
Şekil 8.27 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan ve kullanılarak hazırlanan örneklerin kapilarite katsayılarının karşılaştırılması	153
Şekil 8.28 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin toplam su emme değerleri	155
Şekil 8.29 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin toplam su emme değerlerinin kontrol örneği ile karşılaştırılması	155
Şekil 8.30 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin toplam su emme	

değerleri.....	156
Şekil 8.31 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin toplam su emme değerlerinin kontrol örneği ile karşılaştırılması	156
Şekil 8.32 I. ve II. grup örneklerin toplam su emme değerlerinin karşılaştırılması.....	157
Şekil 8.33 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanmış örneklerin yaşlarına göre eğilme dayanımları	158
Şekil 8.34 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan karışımların eğilme dayanımları.....	158
Şekil 8.35 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin bağıl eğilme dayanımları.....	159
Şekil 8.36 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin yaşlarına göre basınç dayanımı değerleri.....	160
Şekil 8.37 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin basınç dayanımı değerleri.....	161
Şekil 8.38 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin yaşlarına göre eğilme dayanımları	162
Şekil 8.39 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin eğilme dayanımları.....	163
Şekil 8.40 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin bağıl eğilme dayanımları.....	163
Şekil 8.41 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin yaşlarına göre basınç dayanımı değerleri.....	165
Şekil 8.42 Süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan örneklerin 56. gün basınç dayanımı değerlerinin kontrol örneğinin dayanımı ile karşılaştırılması.....	166
Şekil 8.43 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımı	

değerleri.....	166
Şekil 8.44 Süperakışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan örneklerin basınç dayanımı değerlerinin kontrol örneği ile karşılaştırılması.....	167
Şekil 8.45 I. grup örneklerin GEO değerlerinin su/bağlayıcı oranı ile ilişkisi.....	168
Şekil 8.46 I. grup örneklerin ASR değerlerinin su/bağlayıcı oranı ile ilişkisi.	168
Şekil 8.47 I. grup örneklerin klor geçirimliliği değerlerinin su/bağlayıcı oranı ile ilişkisi.	169
Şekil 8.48 I. grup örneklerin su/bağlayıcı oranı- kapiler su emme ilişkisi.....	169
Şekil 8.49 I. grup örneklerin su/bağlayıcı oranı- toplam su emme ilişkisi.....	170
Şekil 8.50 I. grup örneklerin su/bağlayıcı oranı- basınç dayanımı ilişkisi.....	170