İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÖTRE AZALTICI KATKI MADDELERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Turgay KADIOĞLU

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

EYLÜL 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÖTRE AZALTICI KATKI MADDELERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Turgay KADIOĞLU
(501001219)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Eylül 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Kasım 2006

Tez Danışmanı : **Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR**

Diğer Jüri Üyeleri **Prof.Dr. Halit Yaşa ERSOY (M.Ü.)**

Doç.Dr. Yılmaz AKKAYA (İ.T.Ü.)

EYLÜL 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bana yol gösteren Prof.Dr. M. Ali TAŞDEMİR ile yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen Araş.Gör. Dr. Özkan ŞENGÜL ve Araş.Gör. Cengiz ŞENGÜL'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR iii
TABLO LİSTESİ iv
ŞEKİL LİSTESİ v
SEMBOL LİSTESİ vii
ÖZET ix
SUMMARY x
1. GİRİŞ 1
2. RÖTRE 2
2.1. Rötre Olayı 2
2.2. Rötre Türleri 3
2.2.1. Plastik Rötre 3
2.2.2. Otojen Rötre 4
2.2.3. Kuruma Rötresi 4
2.2.4. Karbonatlaşma Rötresi 6
2.3. Rötreye Etki Eden Faktörler 7
2.3.1. Çimentonun Etkisi 7
2.3.1.1. Çimentonun Kimyasal Yapısı 7
2.3.1.2. Çimento İnceliğinin Rötreye Etkisi 8
2.3.1.3. Çimento Kompozisyonun Rötreye Etkisi 8
2.3.1.4. Mineral Katkılar ve Rötreye Etkileri 10
2.3.1.4.1. Silis Dumanı 11
2.3.1.4.2. Uçucu Kül 11
2.3.1.4.3. Genleşen Tip Çimento 12
2.3.2. Su/Çimento Oranının Etkisi 12
2.3.3. Agreganın Etkisi 14
2.3.4. Bazı Kimyasal Katkı Maddelerinin Rötreye Etkisi 16
2.3.5. Betonda Kürün Etkisi 17
2.3.6. Geçirimlilik ve Porozite Etkisi 18
2.3.7. Boyut Etkisi 21
2.3.8. Bağıl Rutubet Etkisi 21
3. RÖTRE HESABI 22
3.1. TS500'e Göre Birim Rötre Deformasyonu Hesabı 22
3.2. Birim Rötre Deformasyonu Hesabı İçin Diğer Bir Yöntem 22
3.3. Amerikan Beton Komitesi - ACI 209 Code Model 25
3.4. Bazant B3 Model 25

3.5. Avrupa Beton Komitesi - CEB 90 Code Model 26
3.6. Sakata Model 26
3.7. Gardner/Lockman Model 26

4. RÖTRE AZALTICI KATKI MADDELERİ (SRA) 28

4.1. Kimyasal Yapısı 28
4.2. SRA-Su Karışımının Yüzey Gerilimi 28
4.3. Çalışma Mekanizması 29
4.4. SRA' nın Buharlaşmaya Etkisi 34
4.5. Uyumluluk ve Mekanik Özelliklere Etkileri 36
4.6. Sünmeye Etkisi 37
4.6.1. Sünme 37
4.6.2. Sünme Deformasyonu Hesap Yöntemi 38
4.6.3. Rötre Azaltıcı Katkı Maddesi'nin Sünmeye Etkisi 39
4.7. Uygulama Şekilleri ve Kullanım Alanları 39

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 40
5.1. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri 40
5.1.1. Agrega 40
5.1.2. Çimento 40
5.1.3. Süper Akışkanlaştırıcı 40
5.1.4. Rötre Azaltıcı Katkı Maddesi 40
5.2. Beton Fazında Yapılan Deneysel Çalışmalar 40
5.2.1. Beton Karışım Kompozisyonu 40
5.2.2. Beton Numunelerin Rötre Ölçümleri 42
5.2.2.1. S/Ç=0,33 Beton Numunelerin Rötre Ölçümleri 42
5.2.2.2. S/Ç=0,53 Beton Numunelerin Rötre Ölçümleri 44
5.2.3. S/Ç=0,33 ve 0,53 Beton Numunelerin Deformasyon-Zaman Grafikleri 45
5.2.4. Elastisite ve Basınç Dayanımı Ölçümleri 46
5.2.4.1. S/Ç=0,33 Beton Numunelerin 28 Günlük Mekanik Özellikleri 46
5.2.4.2. S/Ç=0,53 Beton Numunelerin 28 Günlük Mekanik Özellikleri 47
5.3. Harç Fazında Yapılan Deneysel Çalışmalar 47
5.3.1. Harç Karışım Kompozisyonu 47
5.3.2. Harç Numunelerin Rötre Ölçümleri 49
5.3.2.1. S/Ç=0,33 Harç Numunelerin Rötre Ölçümleri 49
5.3.2.2. S/Ç=0,53 Harç Numunelerin Rötre Ölçümleri 50
5.3.3. S/Ç=0,33 ve 0,53 Harç Numunelerin Deformasyon-Zaman Grafikleri 51
5.3.4. Ağırlık Kaybı Ölçümleri 52
5.3.3.1. S/Ç=0,33 Harç Numunelerin Ağırlık Kaybı Ölçümleri 52
5.3.3.2. S/Ç=0,53 Harç Numunelerin Ağırlık Kaybı Ölçümleri 53

6. SONUÇLAR 55

KAYNAKLAR 57

KISALTMALAR

SRA	: Rötre Azaltıcı Katkı Maddesi
RH	: Rölatif Rutubet
PÇ	: Portland Çimentosu
C_3S	: Tri Kalsiyum Silikat
C_2S	: Di Kalsiyum Silikat
C_3A	: Tri Kalsiyum Alüminat
C_4AF	: Tetra Kalsiyum Alümino Ferrit

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1.	Portland Çimento Bileşimi ……	8
Tablo 2.2.	Kuruma rötresine bazı katkı maddelerinin etkileri ……..	17
Tablo 3.1.	Rötre Katsayısı ε_{cs}	22
Tablo 3.2.	λ ve ε_{s1} katsayıları …….....	23
Tablo 3.3.	ε_{s2} katsayısı ……..…	23
Tablo 3.4.	βs katsayısı …….….	24
Tablo 5.1.	s/ç=0,33 Beton karışımına giren malzemeler ve özellikleri …….	41
Tablo 5.2.	s/ç=0,53 Beton karışımına giren malzemeler ve özellikleri …….	41
Tablo 5.3.	s/ç=0,33 Beton numunelerinin birim deformasyonu (mm/mm) 10^{-5}	42
Tablo 5.4.	s/ç=0,53 Beton numunelerinin birim deformasyonu (mm/mm) 10^{-5}	44
Tablo 5.5.	s/ç=0,33 Beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımı	46
Tablo 5.6.	s/ç=0,53 Beton numunelerinin 7 günlük mekanik özellikleri…..	47
Tablo 5.7.	s/ç=0,53 Beton numunelerinin 28 günlük mekanik özellikleri …	47
Tablo 5.8.	s/ç=0,33 Harç karışımına giren malzemeler ve özellikleri ……...	48
Tablo 5.9.	s/ç=0,53 Harç karışımına giren malzemeler ve özellikleri ……...	48
Tablo 5.10.	s/ç=0,33 Harç numunelerinin birim deformasyonu (mm/mm) 10^{-5}..	49
Tablo 5.11.	s/ç=0,53 Harç numunelerinin birim deformasyonu (mm/mm) 10^{-5}..	50
Tablo 5.12.	s/ç=0,33 Harç numunelerinde ağırlık kaybı ölçümleri …….	52
Tablo 5.13.	s/ç=0,53 Harç numunelerinde ağırlık kaybı ölçümleri …….	53

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	**:** Genleşme ve büzülmenin neden olduğu iç kuvvetler.....	2
Şekil 2.2	**:** Plastik rötre	4
Şekil 2.3	**:** Otopark zemin kaplamasında kuruma rötresi çatlağı.....	5
Şekil 2.4	**:** Plaka betonda kıvrılma olayı……...	5
Şekil 2.5	**:** CO2'li ve CO2'siz ortamda beton numunesinin rölatif nem etkisiyle birim boy değişimi…….....	6
Şekil 2.6	**:** Su/Çimento oranı – Kuruma Rötresi (Bruno D'Souza) ……..	13
Şekil 2.7	**:** Çimento hamurunda su	14
Şekil 2.8	**:** Agrega/çimento ve su/çimento oranlarının kuruma rötresine etkisi….	16
Şekil 2.9	**:** Agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde çatlama……..	19
Şekil 2.10	**:** Betonda boşlukların irtibat derecesi ……	19
Şekil 2.11	**:** Darcy kanunu……...	20
Şekil 4.1	**:** SRA eklentisinin suyun yüzey gerilimine etkisi…….....	29
Şekil 4.2	**:** CSH taneleri arası çekim kuvveti……	30
Şekil 4.3	**:** Menisk halinin, kapiler çekme kuvveti ve bloklar arası mesafeye etkisi……	31
Şekil 4.4	**:** Rötre gerilmesi-Ağırlıkça su kaybı arası ilişki……	32
Şekil 4.5	**:** Boşluk çapına göre suyun buharlaşma hızı……..	34
Şekil 4.6	**:** Gerilme-Birim Deformasyon-Zaman grafiğinde sünme……..	37
Şekil 4.7	**:** Gerilme-Birim Deformasyon-Zaman grafiğinde gevşeme……..	37
Şekil 4.8	**:** Sünme deneyinde tutulmuş ve serbest numune……...	38
Şekil 5.1	**:** s/ç = 0,33 betonunda Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş beton numunelerinin birim deformasyonu……	43
Şekil 5.2	**:** s/ç = 0,53 betonunda Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş beton numunelerinin birim deformasyonu…….....	44
Şekil 5.3	**:** s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 Katkısız Beton Numunelerin Birim Deformasyon - Zaman Grafiği……	45
Şekil 5.4	**:** s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 SRA-1 Katkılı Beton Numunelerin Birim Deformasyon - Zaman Grafiği……	46
Şekil 5.5	**:** s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 SRA-2 Katkılı Beton Numunelerin Birim Deformasyon - Zaman Grafiği……	45
Şekil 5.6	**:** s/ç = 0,33 harç fazında Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş numunelerinin birim boy değişimi……..….	49
Şekil 5.7	**:** s/ç = 0,53 harç fazında Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş numunelerin birim boy değişimi……..	50
Şekil 5.8	**:** s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 Katkısız Harç Numunelerin Birim Deformasyon-Zaman Grafiği……...	51
Şekil 5.9	**:** s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 SRA-1 Katkılı Harç Numunelerin Birim Deformasyon-Zaman Grafiği……...	51

Şekil 5.10 : s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 SRA-2 Katkılı Harç Numunelerin Birim Deformasyon-Zaman Grafiği……... 52
Şekil 5.11 : s/ç = 0,33 harç fazında Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş numunelerin ağırlık kaybı-zaman grafiği……. 53
Şekil 5.12 : s/ç = 0,53 harç fazında Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş numunelerin ağırlık kaybı-zaman grafiği……. 54

SEMBOL LİSTESİ

Pc : Kapiler basınç kuvveti
γ : Sıvının yüzey gerilimi
r : Kılcal boşluk yarıçapı
θ : Kılcal boşlukta katı ile sıvının denge açısı
μ : Suyun moleküler ağırlığı
R : Uluslar arası gaz sabiti
T : Mutlak sıcaklık
ρ : Suyun öz kütlesi
ε : Birim şekil değişimi
ε_{0ag} : Agrega olmadan birim şekil değişimi
V_{ag} : Agrega % oranı
n : Birim deformasyona agrega etkisi için bir katsayısı
Vc : Çimentonun % oranı
Ec : Çimentonun elastisite modülü
Ea : Agreganın elastisite modülü
A : Katının kesit alanı
Q : Birim zamanda geçen sıvı miktarı
L : Katının uzunluğu, sıvının gitmesi gereken yol
K : Geçirimlilik katsayısının özelliği
N : Sıvının viskoelastik özelliği
ΔP : Basınç farkı, basıncın düşüşü
ℓe : Eşdeğer kalınlık
Ac : Elemanın kesit alanı
U : Betonun ortama açık yüzeylerinin kesitteki çevre uzunluğu
ε_{cs} : Büzülme katsayısı
ε_{s1} : Tablo 3.2.' den alınacak katsayı
ε_{s2} : Eşdeğer kalınlık (ℓe)' ye bağlı bir katsayı.
βs : Eşdeğer kalınlık ve zamana bağlı bir katsayı.
λ : Ortamın nemine bağlı katsayı
$\varepsilon_{sh\ (t,\ tsh,o)}$: Birim rötre deformasyonu
t : Zaman
$t_{sh,o}$: Kuruma başlangıç zamanı
$\varepsilon_{sh\infty}$: Son birim rötre deformasyonu
***f*c** : 28 günlük basınç mukavemeti
w : Su muhtevası
Kh : Kesit faktörü
h : Rölatif nem
S(t) : Rötre için zaman fonksiyonu
ε_{cso} : Portland çimentosunun kuruma rötresi
β_{sc} : Çimento tipine bağlı katsayı
β_{RH} : Rölatif rutubet için katsayı
β(h) : Rutubetin rötre üzerinde etkisi

S	**:** Kapiler boşluk doluluk oranı (0-1)
K	**:** Kapiler boşluk kuru halde iken boşluk malzemesinin bulk modülü.
K_s	**:** Kapiler boşluk malzemesinin iskeletinin bulk modülü.
$Ø_c$	**:** Sünme katsayısı
ε_c	**:** Çekme sünmesi birim deformasyonu
$\varepsilon_{\varepsilon l}$	**:** İlk ani deformasyon (yüklenen numunede)
ε_{fs}	**:** Rötre Deformasyonu (serbest kontrol numunesinde)
ε total	**:** Toplam Birim Deformasyon (yüklenen numunede)

ÖZET

Sıcaklık, rüzgar, düşük rutubet gibi etkenlerle birlikte terlemeye bağlı olarak betonda rötre oluşur. Rötre çatlakları beton dayanımını yani servis ömrünü etkilemektedir. Beton karışımına giren malzeme karışımlarının optimize edilmesi ve uygun kür koşulları ile rötre çatlakları azaltılabilir. Bu önlemlerin yanında 1980'li yıllardan itibaren rötre azaltıcı katkılar da kullanılmaya başlanmıştır ancak bu malzemelerin beton özelliklerine etkileri konusundaki tecrübeler yetersizdir.

Bu çalışmanın temel amacı rötre azaltıcı katkıların beton özelliklerine etkilerini incelemektir. Çalışmada iki farklı rötre azaltıcı katkı maddesi kullanılarak iki farklı su/çimento oranında beton ve harç numuneler ile bunları kontrol amaçlı katkısız beton ve harç numuneler üretilmiştir. Numuneler üretimden sonra kür uygulanmadan sabit rutubette bekletilmiştir. Beton numunelerin mekanik özelliklerini incelemek için elastisite modülü ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Harç fazındaki numunelerin ağırlık kayıpları ölçülerek rötre ile buharlaşma arasındaki ilişki incelenmiştir.

Elde edilen deney sonuçları, rötre azaltıcı katkı içeren karışımlarda kontrol numunelerine göre daha az rötre meydana geldiğini göstermektedir. Bu azalma yüksek su/çimento oranında daha belirgindir. Çalışmada kullanılan rötre azaltıcı katkılardan birinin diğerine göre biraz daha etkili olduğu görülmüştür. Rötre azaltıcı katkılı beton numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde katkısız numunelere göre daha düşük oldukları ölçülmüştür. Ancak katkılı betonların dayanımı tasarlanan hedef betonun sahip olması gereken minimum değerden daha düşük değildir. Katkılı ve katkısız beton numunelerin elastisite modülleri arasında ciddi farklar gözlenmemiştir. Harç fazında katkılı numuneler daha çok ağırlık kaybetmelerine karşın daha az rötre yapmışlardır.

SUMMARY

Due to bleeding and factors such as high temperature, wind or low humidity shrinkage of concrete can take place. Shrinkage cracks can affect the durability and strength of concrete. These cracks can be reduced by the optimization of constituent materials and adequate curing. In addition to these precautions, shrinkage reducing admixtures have also been used since 1980s. Experience on these materials and their effects on concrete properties, however, are limited.

The main objective of this study was to investigate the effects of shrinkage reducing admixtures on the properties of concrete. Concretes with two water/cement ratios and also their mortar phases were produced by using two different shrinkage reducing admixtures. Concretes and mortars without these admixtures were also produced for control purpose. After demolding, specimens were subjected to drying in fixed humidity without any curing. Due to studying mechanical properties of concrete specimens, modulus of elasticity and compressive strength tests were done. Weight loss in mortar phase was measured in order to investigate the relation between shrinkage and evaporating.

The test results show that specimens with the shrinkage reducing admixtures have less shrinkage compared to the control specimens. This reduction in shrinkage was more distinct for the specimens with higher water/cement ratios. It is observed that one of the admixtures is more effective in reducing the shrinkage. On the other hand, incorporating SRA leads to a slight reduction of the compressive strength of concrete. However, strength of concrete with admixtures is not under the minimum value of target concrete's strength. There is no significant difference in the modulus of elasticity of specimens with and without SRA. In spite of much weight loss in the mortar specimens incorporated SRA, they have less shrinkage deformation.

1. GİRİŞ

Olumsuz çevre koşullarına maruz kalan betonlar için sadece mukavemetten bahsetmek yetersiz olur. Bu betonların, istenen mukavemeti maksimum süre sağlayabilmeleri gerekmektedir. Yani dayanıklı olmalıdırlar. Bir başka deyişle bu betonların tasarımında mukavemetin yanında servis ömrü de bir parametre olarak yer almalıdır.

Dayanımı yüksek bir beton üretmek için çimento hamuru miktarını minimum yapacak optimum agrega granülometrisi, düşük su/çimento oranı, doğru yerleştirme-sıkıştırma, yeterli sürüklenmiş hava, temiz yüzeyli sağlam agrega ve yeterli rutubet kürü gerekmektedir. Bunların dışında kimyasal katkılar kullanarak da dayanım arttırılabilir.

Betonun dayanımını azaltan en olumsuz etkenlerden biri de rötredir. Genel olarak betonun büzülmesi şeklinde tanımlayacağımız rötre, beraberinde betonda yüzeysel veya derin çatlakları da getirir. Betonarme yapılarda betonun, basınç kuvvetini karşılamasının yanında donatıyı muhafaza etmek gibi bir görevi daha vardır. Ancak rötre sonucunda oluşacak çatlaklardan hava, su ve kimyasal maddelerin donatıyı korozyona uğratması kaçınılmaz olacaktır. Bu yüzden rötre, hem estetik hem de statik olarak kötü sonuçlara sebep olabilir.

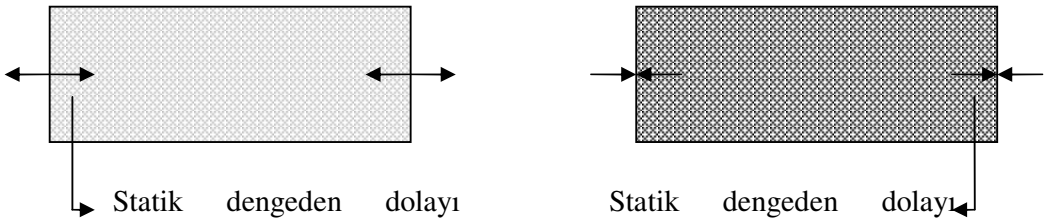
Bu çalışmada betonun dayanımında hayati rol oynayan rötre ve çalışma mekanizması ile son yıllarda yaygın kullanılmaya başlanan rötre azaltıcı katkı maddeleri (SRA) kullanılarak üretilmiş betonlarda rötre ve diğer mekanik özelliklerin nasıl etkilendikleri incelenmiştir. Su/çimento oranının değişimiyle SRA kullanılmış betonlarda rötre miktarları karşılaştırılmış, harç fazında bu katkıların nasıl sonuç verdikleri deneysel çalışmalarla anlatılmıştır.

2. RÖTRE

2.1. Rötre Olayı

Betondaki su miktarının, çimento hidratasyonu ve çevresel etkiler nedeniyle, azalması sonucu çimento matrisinde iç gerilmeler oluşur ve beton büzülmeye karşı zorlanır. Betonda su kaybının neden olduğu bu hacimsel değişikliğe "Rötre" denir.

Yapıların sadece çimento hamurundan yapılmamasının nedeni; fiyatından başka, yüksek hidratasyon ısısı ve çimento hamurunun bünyesindeki suyu kaybetmesiyle meydana gelen büzülmedir. Betondan ayrılan suyun rötreye neden olması gibi, betona katılan su da bir miktar genleşmeye neden olur. Ancak bu genleşme, rötre gibi tehlikeli değildir. Çünkü beton içerisinde genleşme sırasında basınç gerilmeleri oluşacakken, büzülme sırasında çekme gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler betonun şekil değiştirme süresince ona karşı gelen unsurlar tarafından oluşturulur ve buna bağlı olarak mikro çatlaklar oluşur.



Şekil 2.1 : Genleşme ve büzülmenin neden olduğu iç kuvvetler

Betonun deformasyonunu engelleyen unsurlar bir şekilde mutlaka vardır. Örneğin ; agregalar, betonarme içindeki donatı, yapı elemanları düğüm noktaları (temel-kolon-kiriş-döşeme birleşim noktaları) gibi etkenler betonun rötre ve genleşmeye bağlı hareketini kısıtlarlar ve bu da mikro çatlaklara sebep olur.

Rötre, beton veya betonarme yapı elemanlarının hem mimari açıdan görünüş hem de dayanımını olumsuz yönde etkiler. Otopark zemin kaplamalarında, havaalanları pistlerinde, betonarme perde duvarlarda, dış cephe prekast elemanlarda, köprü ayaklarında, liman yapılarında hayati önem taşır. Özellikle kimyasal etkilere (sülfat, alkali-silika reaksiyonlar) maruz kalan betonarme yapı elemanlarında rötrenin neden olduğu çatlaklardan dolayı donatının korozyona uğraması kaçınılmazdır. Kısacası rötre, yapının servis ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden biridir.

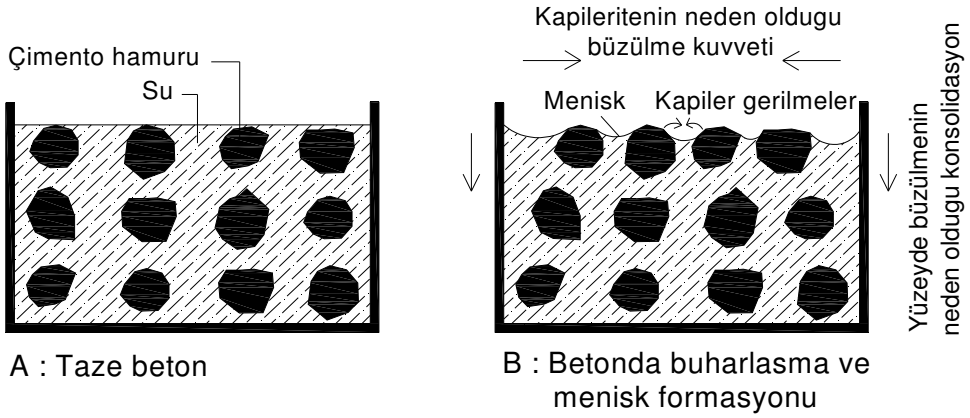
2.2. Rötre Türleri

2.2.1. Plastik Rötre

Taze beton yerleştirildikten sonra agrega dibe doğru çökelirken su, yüzeye doğru çıkmaya başlar. Yüzeydeki su, rüzgar veya güneşin etkisiyle buharlaşırken beton içinde hidratasyon bünyedeki suyu kullanmaya devam eder. Bu aşamada yüzeydeki buharlaşma hızı, terleme hızından fazla olursa betonda "plastik rötre" meydana gelir. (Neville, 2000)

Plastik rötrenin sonucu olarak beton yüzeyinde kapileriteden dolayı mikroskobik ölçekte hacim değişiklikleri olur. Bu hacim değişikliğinden dolayı beton yüzeyinde çatlaklar oluşması muhtemeldir. Çünkü, bu bölge yani yüzey, çoğunlukla çekme gerilmelerini karşılayacak elemanlardan yoksun bölgelerdir. (Neville, 2000)

Beton içerisinde veya yüzeyinde kapileriteden dolayı oluşan menisk hali betonda bir basınç etkisi oluşturur. Üst kısım büzülmeye zorlanırken, alt kısım sıkışmaya başlar. Bu basınç etkisi beton içindeki suyun, kılcal boşluklardan yukarı doğru çıkışını hızlandırır. Basınç etkisiyle kendisine daha kolay ve kalıcı bir yol açan su, betonun ilerleyen zamanlarda donatısının korozyona uğramasına neden olacak bu boşlukları da birleştirmiş ve betonun geçirimliliğini arttırmış olur.



Şekil 2.2 : Plastik rötre

2.2.2. Otojen Rötre

Otojen rötre, betonun dış etkenlerden (bağıl nem, rüzgar, kür vb.) bağımsız olarak sadece kendi bünyesindeki çimento hidratasyonunun neden olduğu hacimsel değişimden kaynaklanan rötredir. (Lynam, 1934)

Çimento, su ile temas ettiğinde hidratasyon işlemi başlar. Fakat hidratasyon sonucu oluşan çimento-su karışımı hacim olarak hidratasyona girmemiş çimento-su karışımı miktarından daha az olacağından bu aşamada betonda küçük bir hacimsel değişiklik olur. Hidratasyonun neden olduğu bu kendiliğinden kuruma için çimento ağırlığının yaklaşık %25' i kadar su gerekmektedir. (Ersoy, 1985) Bu yüzden otojen rötre normal veya yüksek su/çimento oranlı betonlar yerine düşük su/çimento oranlı (<%40), yüksek mukavemetli betonlarda gözlenir. (D.P.Bentz ve O.M.Jensen, 2004)

Beton katkı teknolojisinin bugünkü kadar gelişmediği yıllarda işlenebilirliği arttırmanın en yaygın yolu su/çimento oranını arttırmaktı. Günümüzde ise yüksek oran su azaltıcı katkı maddeleri sayesinde düşük su/çimento oranında daha mukavemetli ve işlenebilir beton üretmek mümkündür. Bu yüzden otojen rötre, önceki yıllardan çok günümüzde üzerinde çalışma yapılan bir konu olmuştur.

2.2.3. Kuruma Rötresi

Beton dökümünden sonra çevre koşullarına göre ısı dengeleninceye kadar betonun çevresiyle ısı alışverişi devam eder. Eğer yüzeydeki ısı, iç ısıdan az ise beton içerisinde su, ısı dengeye ulaşıncaya kadar buharlaşır. Yine beton ve çevresi arasında nem farkı da su buharı transferine yol açar. Ortamın rutubeti, betonun kendi

rutubetinden az ise, buharlaşma rutubetin fazla olduğu taraftan kuru tarafa devam edecektir. Bunun sonucunda betonda mikroskobik ölçekte büzülme meydana gelir, buna "kuruma rötresi" denir.

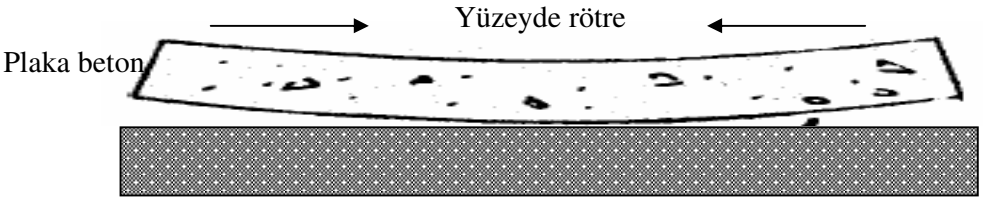
Betonda kuruma rötresinin miktarı suyun buharlaşma hızıyla değil, beton içindeki suyun difüzyon hızıyla ilgilidir. Çünkü betonun yüzeyine yakın kısımlardaki su, havadaki nemle çabucak dengeye ulaşırken iç bölgelerdeki nem dengesi, betonun difüzyona müsaade hızıyla alakalı olacaktır.



Şekil 2.3 : Otopark zemin kaplamasında kuruma rötresi çatlağı

Şekil 2.3 de otopark zemin kaplamasında derz yapılarak kuruma rötresi çatlaklarının derz boyunca ilerlemesi beklenmiş ancak başarılı olunamamış.

Kuruma rötresinin betonun yüzeyinde ve alt bölgelerinde farklı miktarlarda olması özellikle plaka betonlarda kıvrılmaya neden olur. Bu da rötrenin neden olduğu çatlakların dışında, trafik yükü ve beton plağının kendi ağırlığının bükülmüş beton plağını zorlamasıyla ilave çatlaklar oluşacaktır. (Bissonnette, 1996)



Şekil 2.4 : Plaka betonda kıvrılma olayı

Kaplama betonda üst kısım ile alt kısım arasında farklı kuruma sonucunda betonda kıvrılma meydana gelmiştir.

2.2.4. Karbonatlaşma Rötresi

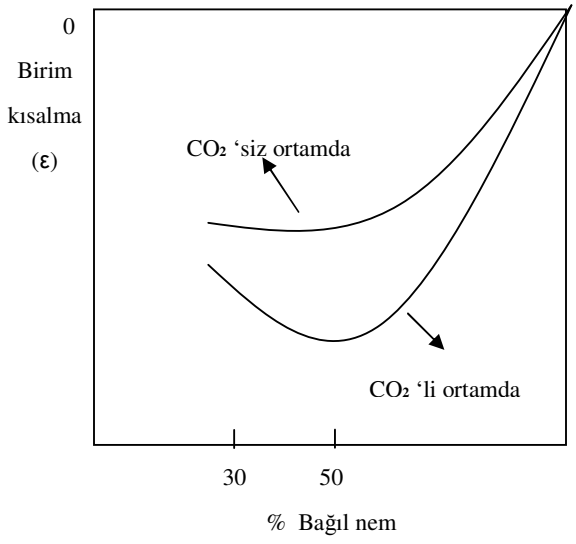
Atmosferdeki CO_2 (karbondioksit) çimento hamurunu etkileyebilir ve rötreye sebep olabilir. Karbonatlaşma rötresi olarak isimlendirilen bu işlem su veya ağırlık kaybıyla ilgili değildir. Hatta karbonatlaşma rötresi sonunda ağırlıkta bir miktar artış da olur. CO_2 çimento hamurundaki serbest $Ca(OH)_2$ (kalsiyum hidroksit)'i etkileyebilir ve aşağıdaki basitleştirilmiş reaksiyona sebep olabilir.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \textbf{(2.1)}$$

Karbonatlaşma rötresinin mekanizması ile ilgili çeşitli teoriler vardır. Bunlardan bir tanesi ; $Ca(OH)_2$, boşluklardaki menisklerin mevcudiyetinden dolayı bir basınç gerilmesi altındadır. Bu kristaller dayanak görevi görürler ve CSH jel parçacıklarının çökmesini engellerler. $Ca(OH)_2$' in çözülmesi ve yerine gerilme altında olmayan $CaCO_3$ çökeltisine dönüşmesi, CSH jelinin çökmesine sebep olabilir. Bu da rötreye yol açar. (Powers, 1962)

Diğer bir teoriye göre, denklem (2.1) de gösterildiği gibi $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$' a dönüşürken H_2O (su) açığa çıkar ve bu su, ortaya çıktıkça ıslanma-kuruma çevrimiyle buharlaşıp rötreye neden olacaktır. (Ramachandra, 1981)

Rötre, CO_2'li ve CO_2 'siz ortam koşullarında bağıl rutubetin etkisiyle nasıl davranış gösterdiği Şekil 2.5 de verilmiştir. (Verbeck, 1958)



Şekil 2.5 : CO_2'li ve CO_2'siz ortamda beton numunesinin bağıl nem etkisiyle birim boy değişimi. (Verbeck, 1958)

CO_2'nin yaklaşık %50 bağıl rutubette kuruma rötresini arttırdığı şekil 2.5 de görülmektedir. Yüksek nem ve doygun su şartları altında numuneler genellikle CO_2 emmez. Aynı şekilde %30 dan az bağıl rutubette CO_2 ile reaksiyon azalır.

Karbonatlaşma, betonun mukavemetini arttırırken karbonatlaşma sonucu ortaya çıkan $CaCO_3$, genleşen hacminden dolayı betonun boşluklarını azaltır. Böylece betonun geçirimliliği de azalmış olur. Ancak betonun alkalitesi $CaCO_3$ sebebiyle azalır. Karbonatlaşma, genellikle havayla doğrudan temas eden yüzeylere yakın bölgelerde oluşur. Beton yüzeyinden donatıya doğru yaklaşırsa donatıda korozyon tehlikesi başlar.

2.3. Rötreye Etki Eden Faktörler

2.3.1. Çimentonun Etkisi

2.3.1.1. Çimentonun Kimyasal Yapısı

Çimento, su ile priz almaya başladıktan sonra havada ve suda sertleşmesine devam edebilen hidrolik bir bağlayıcıdır. Çimentonun kimyasal içeriğini tri-kalsiyum silikat (C_3S : $3CaO.SiO_2$) , di-kalsiyum silikat (C_2S : $2CaO.SiO_2$) , tri-kalsiyum alüminat (C_3A : $3CaO.Al_2O_3$) ve tetra-kalsiyum alümino ferrit (C_4AF : $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) oluşturur.

Çimentonun yaklaşık %65'ini teşkil eden kalsiyum oksit (CaO)'in kaynağı kireç taşı veya kalsiyum karbonat ($CaCO_3$)'dır. Kireç taşının yüksek sıcaklıkta alüminyum oksit , demir oksit ve silisyum oksit ile reaksiyona girmesiyle C_3S, C_2S, C_3A ve C_4AF den oluşan çimento üretilmiş olur.

Çimentonun sertleşmesinin kimyasal ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$C_3S + H_2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + Ca(OH)_2 \quad \textbf{(2.2)}$$

$$C_2S + H_2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + Ca(OH)_2 \quad \textbf{(2.3)}$$

$$2C_3A + 18H_2O \rightarrow C_2AH8 + C_4AH_{10} \quad \textbf{(2.4)}$$

$$2C_3A + 32H_2O + 3(Ca^{2}(suda) + SO_4{}^{2}(suda)) \rightarrow C_6AS_3H_{32}\ (etrenjit) \quad \textbf{(2.5)}$$

$$C_6AS_3H_{32} + 2C_3A \rightarrow 3C_4ASH_{12} \quad \textbf{(2.6)}$$

Tablo 2.1 : Portland Çimentosu Bileşimi

Kimyasal İçerik	Oran %	Klinker	Oran %
SiO	22,6%	Tri-kalsiyum silikat $(CaO)_3.SiO_2$, C_3S	45-65 %
Al_2O_3	4,3 %	Di-kalsiyum silikat $(CaO)_2.SiO_2$, C_2S	15-30 %
Fe_2O_3	2,4 %	Tri-kalsiyum alüminat $(CaO)_3.Al_2O_3$, C_3A	1-8 %
CaO	64,4 %	Tetra-kalsiyum alüminoferrit $(CaO)_4.Al_2O_3.Fe_2O_3$, C_4AF	8-15 %
MgO	2,1 %	Jipsiyum $CaSO_4$	1-3 %
SO_3	2,3 %		
Na_2O ve K_2O	0,6 %		

2.3.1.2. Çimento İnceliğinin Rötreye Etkisi

Betonda rötre doğrudan çimento ile ilgilidir. Çimento dozajı arttıkça betonda rötre miktarı da artacaktır. Çimentonun inceliği rötre üzerinde çok fazla etkili değildir. Hidratasyon sonucu oluşmuş çimento hamurları (C-S-H) birbirlerini çekerek aralarındaki boşlukları daraltırlar. Hacimsel olarak betonda şekil değişimine neden olan bu daralma çimentonun inceliği ile değil, çimento hamuru taneleri arasındaki mesafeyle ilgilidir. Bir başka deyişle rötre miktarı, çimento hamuru yoğunluğu ile ilgilidir. (Neville, 2000)

Çimento incelik artışı betonda boşluk oranını azaltır. Diğer yandan incelik arttıkça su ihtiyacı da artacak, dolayısıyla işlenebilirlik azalacaktır. (Powers, 1954)

Günümüzde yaygın kullanılan yüksek oran su azaltıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanımıyla inceliğin artışının beraberinde getirdiği su ihtiyacı azaltılabilir. Böylece işlenebilirlik artıp, porozite azaltılabilir. Daha geçirimsiz bir betonun rötre miktarı da az olacağından çimentonun inceliğinin artışı, rötreyi de azaltmış olur.

2.3.1.3. Çimento Kompozisyonunun Rötreye Etkisi

Çimentonun erken hidrate olması C_3A miktarının kontrolü altındadır. C_3A çok hızlı hidrate olarak çimentonun da hızlı bir şekilde bağlayıcı özelliği kazanmasını sağlar. C_3A miktarının fazla olması ; hızlı ve yanlış yerleşme, düşük slump ve çimento bileşiminde uyuşmazlığa neden olacaktır. Hızlı sertleşme ve yanlış yerleşmenin

sonucu olarak yüksek su kaybı ve yüksek geçirimlilik, rötrenin artışına neden olacaktır. (Previte 1977, Whiting 1981, Meyer ve Perenchio, 1979)

C_3A, suda kalsiyum (Ca) ve sülfat (SO_4) tuzları ile reaksiyona girmesi sonucu Denklem 2.5 deki gibi etrenjiti oluşturur. Çimento hacminde yaklaşık %700 oranında bir genleşmeye sebep olan etrenjit sonucunda genleşmeden dolayı betonda çatlaklar oluşur. Bu çatlakların varlığı sülfat atağında betonun savunmasız kalmasına neden olur. (Neville, 1973, Verbeck, 1968)

C_3S ve C_2S uzun dönemde çimentonun kendi karakteristik özelliklerini belirlemede birincil etken malzemelerdir. C_3S miktarındaki artış, erken hidratasyon ve erken mukavemet sağlayacaktır. Ancak bu erken mukavemet betonun yaşı ilerledikçe son mukavemet değerinin düşük kalmasına neden olacaktır. Rötre açısından düşünürsek, erken priz alma rötrenin artışı demek olacaktır. C_2S, hidratasyonu yavaşlatır ancak uzun dönemde son mukavemet değerini arttırır. Yavaş hidratasyon özelliği sayesinde C_2S rötrenin azalmasını sağlar. (Meyer ve Perenchio, 1979)

Tazawa ve Miyazawa'ya göre çimento bileşiminin otojen rötrede, kuruma rötresine göre daha fazla bir etkisi vardır. Normal Portland çimentosuna göre kıyasla erken mukavemet alan çimento türlerinin erken zamanlarda, yüksek fırın cüruf çimentosunun ilerleyen zamanlarda daha fazla otojen rötreye sebebiyet verdikleri gözlemlenmiştir. Daha az otojen rötre Portland çimentosundaki düşük hidratasyon ısısına sahip yüksek C_2S içeriğine bağlıdır. Bunun tam tersi C_3A ve C_4AF miktarlarının artışı otojen rötreyi arttırır. (Tazawa ve Miyazawa, 1997)

Çimento kompozisyonunda malzemelerin oranlarında değişiklikler yapılarak farklı amaçlara hizmet eden çeşitli çimento sınıfları oluşturulmuştur. (http://en.wikipedia.org/wiki/Portland_cement)

Tip-1 : Genel kullanım Portland çimentosudur. Bu sınıf çimentoda C_3A miktarı %15'i aşamaz. Kimyasal içeriği yaklaşık olarak 55% (C_3S), 19% (C_2S), 10% (C_3A), 7% (C_4AF), 2.8% MgO, 2.9% (SO_3), 1.0% kızdırma kaybı ve 1.0% serbest (CaO) gibidir.

Tip-2 : Orta derece sülfat atağına maruz kalan ve hidratasyon ısısının fazla olmaması istenen betonlar için kullanılır. Bu tip çimentoda C_3A miktarı %8'i, C_3A+C_3S miktarı da %58'i aşmaz. Dolayısıyla sülfat içeren zemin suyuna maruz temel betonlarında, hem büyük kütlelerinin hidratasyon ısısını (C_3S miktarı az

olduğu için) orta seviyede muhafaza ederler hem de zemin suyunda sülfat atağına karşı (C_3A içeriği az olduğu için) sülfatla reaksiyona girmesi muhtemel C_3A'nın etrenjite dönüşüp genleşmesi ve çatlaklar oluşturup betona zararlı alkalilerin girmesi engellenir. Tip-2 çimentonun maliyeti Tip-1 ile neredeyse aynıdır.

Tip-3 : Erken mukavemet istenen durumlarda Tip-3 çimento kullanılabilir. İçeriğinde C_3S miktarı fazla olduğu için hidratasyon ısısı ve rötresi fazla olacağından kütle betonlarında kullanılmaları sakıncalıdır. Tip-3 çimentonun 3 günlük mukavemeti Tip-1 ve Tip-2 çimentonun 7 günlüğüne, 7 günlük Tip-3 mukavemeti , Tip-1 ve Tip-2'nin 28 günlük basınç mukavemetine eşittir. Ancak altı ay sonra bu üç tip arasında mukavemet farkı çok az veya hiç olmayacaktır.

Tip-4 : Geç mukavemet alan bu tip çimentoların en önemli özelliği hidratasyon ısısının çok düşük olmasıdır. Tip-4 çimentolarda C_2S ve C_4AF oranları yüksek, C_3S ve C_3A oranları düşüktür. Hem C_3S oranı düşük olduğu için rötre çatlakları hidratasyon ısısının düşük olmasından dolayı minimum düzeyde kalacaktır hem de C_3A oranı düşük olduğundan sülfata dayanımı fazladır. Bu yüzden barajlarda kullanılması tercih edilir. Tip-4 çimentonun bir veya iki sene sonraki mukavemeti, prizinin yavaş ilerlemesi sayesinde, diğer tip çimentolara oranla daha fazla olacaktır. Maliyeti yüksek olan bu tip çimentonun maliyetini düşürmek için karışımına puzolanlar ilave edilir.

Tip-5 : Sülfata dayanım amacıyla kullanılırlar. Bu tip çimentolar çok az (maksimum %5) C_3A içerirler. Ayrıca $2.C_3A+C_4AF$ miktarına da maksimum %20 sınırlaması getirilmiştir. Bu özelliği sayesinde Tip-5 çimentolu betonlar atık su kanallarında, altyapı imalatlarında kullanılırlar.

Tip-1a,2a ve 3a : Hava sürükleyici katkı maddeleri bünyelerinde bulundurdukları için donma-çözülme çevrimlerine karşı dayanıklıdırlar.

2.3.1.4. Mineral Katkılar ve Rötreye Etkileri

Yüksek mukavemetli ve düşük geçirimli betonlarda kullanılan uçucu kül ve silis dumanı en çok kullanılan mineral katkılardır. Genellikle bazı mineral katkılar betonun su ihtiyacını arttırırlar. Teorik olarak, su ihtiyacının arttıkça rötrenin de artması gerekir. Ancak, yapılan bazı çalışmalar bunun tam tersine mineral katkıların her zaman rötreyi arttırmadığını göstermiştir. (David W. Mokarem, 2002)

2.3.1.4.1. Silis Dumanı

Silis dumanı, normal portland çimentosundan 100 kat daha küçük tane çapına sahiptir. Bu malzeme, inceliğinin yüksek olması sebebiyle yüksek miktarda su ihtiyacına neden olur. Su miktarının artması mukavemet, geçirimlilik ve rötre açısından olumsuz olacağından bu minerallerle beraber yüksek oran su azaltıcı katkı maddeleri kullanılmalıdır.

Bloom, yaptığı deneyde üç farklı su/(çimento+silis dumanı) değeri için silis dumanının plastik rötreye etkisini incelemiştir. 0,33 su / bağlayıcı oranında silis dumanı, düşük su oranı yüzünden plastik rötre çatlaklarına sebep olmuştur. 0,50 su / bağlayıcı oranında, su oranı yüksek olduğu için silis dumanı ince yapısı sayesinde boşlukları doldurucu özelliğini kazanmış ve daha geçirimsiz, çatlak miktarı çok daha az bir beton elde edilmiştir. 0,40 su / bağlayıcı oranında rötre çatlakları gözlenmiş ancak yine 0,40 su / çimento oranında silis dumanı katılmadığı durumda rötre çatlaklarının azaldığı tespit edilmiştir. (Bloom, 1995)

Haque, kuruma rötresinin azaltılması için çimentoya eklenmesi gereken silis dumanının %5-%10 ağırlıkça çimentoya katılmasını önermiştir. %20' den fazla uçucu kül ve cürufun rötreyi arttıracağını belirtmiştir. (Haque, 1996)

Kür koşulları, silis dumanının su ihtiyacını arttırması yüzünden, çok önemlidir. Aksi takdirde rötreyi ve geçirimliliği azaltması beklenen bu mineral katkı türü tam tersi bir etkiyle çatlamalara sebep olacaktır.

2.3.1.4.2. Uçucu Kül

Uçucu küllerin tane çapları 1 mikron ile 100 mikron arasında değişir ancak %50' si 20 mikronun altındadır. Su ihtiyacını azaltması, işlenebilirliği arttırması ve mukavemeti zamanla arttırması gibi olumlu etkilere sahiptirler. N Sınıfı natürel puzolanları saymazsak iki sınıf uçucu kül mevcuttur. Yüksek miktarda kalsiyum içeren C Sınıfı Uçucu Küller ve düşük miktarda kalsiyum içeren F Sınıfı Uçucu Küller. C Sınıfı, kimyasal etkileri F Sınıfına göre daha etkindir. Su ihtiyacını azalttıkları ve kimyasal genleşmeleri sayesinde rötreyi de azaltırlar. (Mehta, 1986)

Uçucu küller, kür koşullarının iyi olmadığı ortamlarda normal Portland çimentosu kullanılmış betona göre daha olumlu sonuçlar verir. Kür iyi yapıldığı takdirde (7 gün boyunca 20 ℃ ve %100 bağıl nem) normal beton ile uçucu küllü beton arasında fazla bir fark görülmez. (Gebler, 1950)

2.3.1.4.3. Genleşen Tip Çimento

Çimentonun genleşmesi, CaO ve MgO katılımıyla gerçekleşir. Reaksiyona girmemiş CaO ağırlıkça %1-70 oranında ve MgO'in %2-7 oranında katılımıyla çimento klinkerinin yeterli sıcaklıkta tüm silikatların CaO ile reaksiyona girip C_3S formuna dönüşmesi ve hiç C_2S kalmayıncaya kadar bu işlemin devam ettirilmesi sonucu genleşen tip çimento üretilir.

Üç tip genleşen çimento vardır. Tip K (anhidros kalsiyum alüminat), Tip M (kalsiyum alüminat ve kalsiyum sülfat), Tip S (tri kalsiyum alüminat ve kalsiyum sülfat)

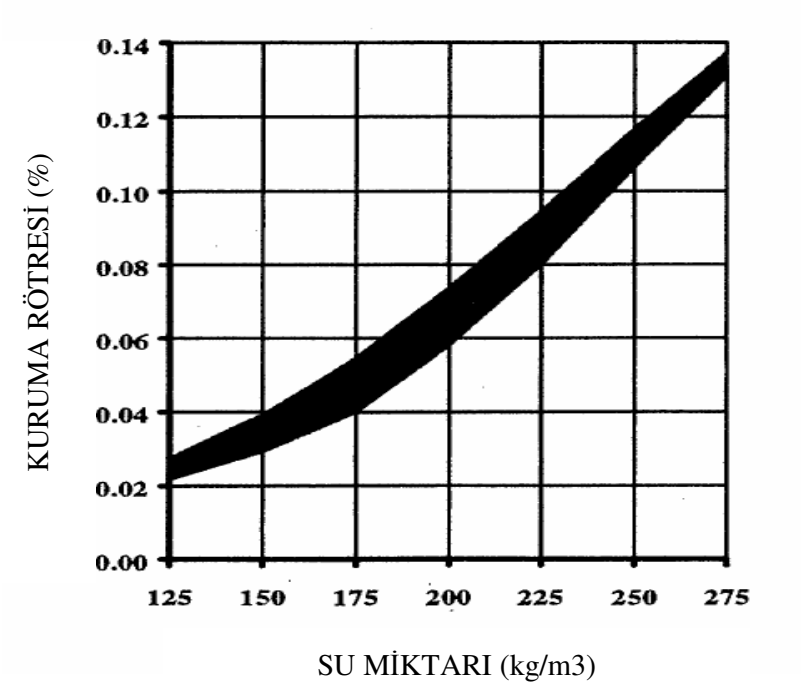
Genleşen tip çimentonun neden olabileceği en önemli problem; kontrol altında tutulamayan, çevre şartlarının neden olabileceği, kimyasal reaksiyonlardır. Beton zamanla genleşmeye devam edebilir ve bu genleşme donatıda ilave gerilmelere neden olur.

Genleşen tip çimento kullanımı harç fazında rötreyi önemli ölçüde azaltırken betonda aynı etkiyi yapamaz. Çünkü agregalar, rötreyi engellemeye çalıştıkları gibi genleşmeyi de engellemeye çalışırlar. (Saito, 1991)

2.3.2. Su / Çimento Oranının Etkisi

Su/Çimento oranı betonda rötre miktarını etkileyen en önemli faktördür. Su/Çimento oranı arttıkça rötre de artar. Karışımdan zamanla uzaklaşıp hacim değişikliğine sebep olacak ana unsur "su" dur. Hidratasyon için gerekli su miktarından fazlası rötreyi arttıracaktır.

Beton karışımına katılan su, çimento ile reaksiyona girip hidratasyonu başlatır. Hidratasyon ile beton priz almaya, yani plastik kıvamını kaybederek sertleşmeye başlar. Çimentonun kimyasal içeriğine bağlı olarak priz alma süresi 1 ile 10 saat arasında değişir. Normal tip (tip-1) çimentolarda bu süre 2 saat civarındadır. Ayrıca ortam sıcaklığının düşüşü priz alma süresini geciktirirken sıcaklık artışı priz süresini azaltır. (http://www.cimsa.com.tr)



Şekil 2.6 : Su miktarı – Kuruma Rötresi (Bruno D'Souza, 2005)

Çimento hamurunda su üç halde bulunur;

1. Kimyasal bağ ile tutulan su, yani kristal suyu. Çimento ile reaksiyona girmiş bu suyu bünyeden ayırmak için 1000 ℃ üzerinde bir sıcaklık gerekmektedir. (Aron ve Mehta, 1965)

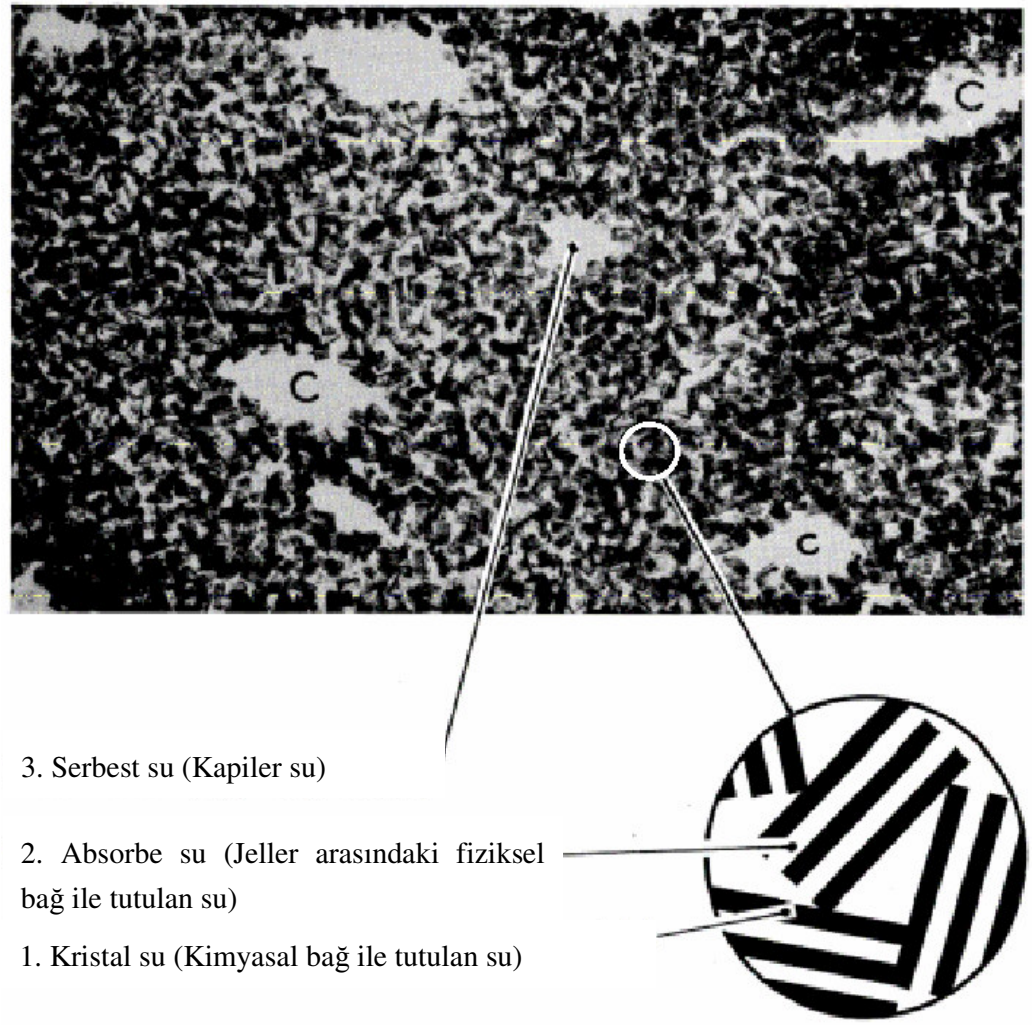
Powers'a göre kimyasal bağ ile tutulan suyun pastadaki miktarı yaklaşık olarak 0,23 gr/ reaksiyona girmiş 1 gr çimento'dur.

2. Absorbe su, CSH jellerinin yüzeyine tutunmuş sudur. Bu suyu 105℃ de kısmen buharlaştırmak mümkündür. (Aron ve Mehta, 1965)

İki CSH tanesi arasındaki mesafe 3,0 nm den daha az ise, bu bölgedeki su kolayca buharlaştırılamaz. Çünkü birbirine bu kadar yakın iki CSH tanesi arasındaki çekim kuvveti suyu alıkoyacaktır. Absorbe suyun çimento hamurundaki yaklaşık miktarı 0,19 gr / reaksiyona girmiş 1 gr çimento' dur. (Powers, 1968)

3. Kapiler su, boşluklarda bulunan bu suyu buharlaştırmak için 105℃ yeterlidir. Kapiler boşluk hacmi büyüdükçe çimento pastasından suyun kaçışı daha kolay hale gelir. Çünkü küçük boşluklardaki su için tutunma yüzeyi daha fazladır. (Aron ve Mehta, 1965)

Yine Powers'a göre kolay buharlaşabilen ve rötreye sebep olan çimento hamurundaki bu suyun miktarı yaklaşık olarak 6,4 ml / 100 gr reaksiyona girmiş çimento'dur.



Şekil 2.7 : Çimento hamurunda su (Powers, 1946)

2.3.3. Agreganın Etkisi

Agregaların su emme oranları çimentoya göre çok daha azdır. Ayrıca elastisite modülleri taze çimento hamurununkine göre daha yüksek oldukları için rijittirler. Bu açıdan bakıldığında agrega iki açıdan rötre üzerinde etkilidir. Birincisi; karışımdaki yüksek agrega oranı, düşük su/çimento oranı demek olacağından rötre de azalmış olur. İkincisi; iyi yıkanmış temiz agrega, çimento hamuru için iyi tutunma yüzeyleri demektir. Böylece daha rijit bir karışım elde edilir.

Agrega maksimum tane çapının rötreyi belirleyici bir etkisi yoktur (Bissonnette, 1996). Ancak şantiye koşullarında agrega tane çapının büyük olması, betonun işlenebilirliğini ve yerleşmesini özellikle donatısı yoğun betonarme yapılarda olumsuz etkileyecektir. Bu açıdan bakıldığında yerleşmenin, sıkışmanın iyi olmaması betonun geçirimliliğini arttıracak bu da rötre miktarını arttıracaktır.

Teorik olarak, karışımdaki agrega miktarları hacim olarak eşit ancak maksimum tane çapları farklı olan iki numuneyi kıyaslayalım, agrega çapı küçük olan karışımda agrega yüzey alanı da fazladır. Bu da daha fazla su emme yüzeyi demektir. Ancak agregaların su emme miktarları (2.3.6. Geçirimlilik ve Porozite konusunda bahsedilmiştir) çok düşük olduğu için agrega yüzey alanından çok, agreganın cinsi önemlidir.

Han ve Walraven (Han, 1994), agrega cinsinin rötreye etkisini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Üç farklı tip agrega (kireçtaşı, kırmataş ve granit) ile yüksek mukavemetli beton numuneleri üreterek bunların rötre miktarlarını gözlemlemişlerdir. Buna göre en az rötre yapan numune, en yüksek erken elastisite modülüne sahip kireçtaşı agregalı numune olmuştur.

Hafif agregaların, normal veya ağır agregalara oranla daha az elastisite modülüne sahip oldukları, yani daha boşluklu yapıda oldukları bilinmektedir. Dolayısıyla normal agregalarla kıyaslandığında hafif agregalı beton numunesi daha fazla rötre yapacaktır. Ancak, ıslatılmış hafif agrega kullanılarak yapılan beton numunelerinin normal veya ağır agrega kullanılarak yapılan numunelerden daha az rötre yaptığı da gözlemlenmiştir. Boşluk oranı yüksek olan hafif agregaların boşluklarındaki su, rötreyi daha fazla belirleyici bir etken olmuştur. (David W. Mokarem, 2002)

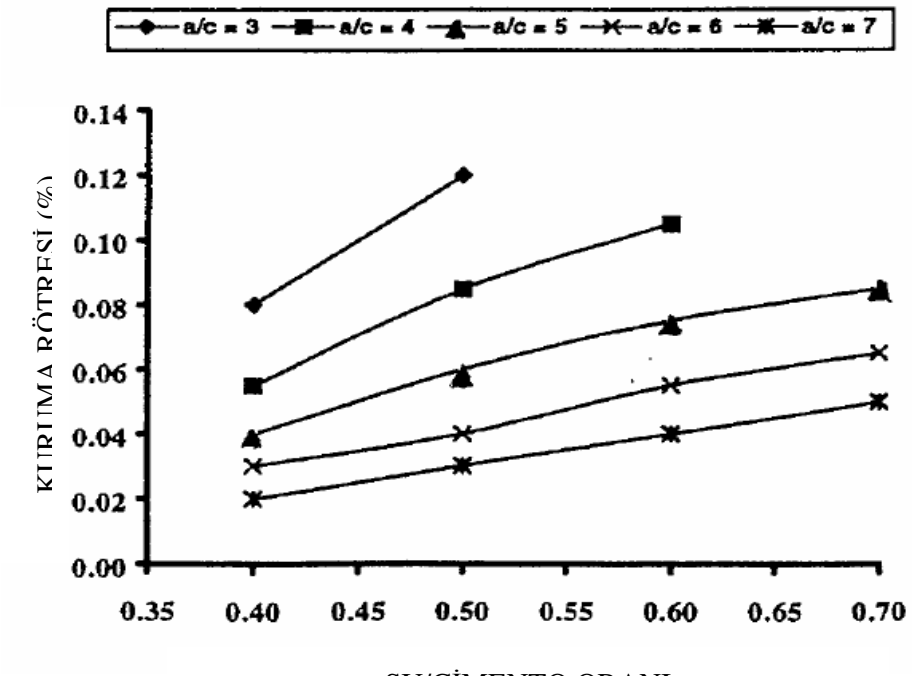
Picket, agreganın rötreyi azaltma miktarıyla ilgili bir denklem önermiştir. (Picket, 1956)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1\text{-}Vag)^n \qquad \textbf{(2.7)}$$

ε_0 : Agrega olmadan birim şekil değişimi
Vag : Agrega % oranı (%50 için 0,50)
n : katsayı (1,2-1,7) (L'Hermite, 1960)
n : 3.(1-Vc) / [1+Vc+2.(1-Va).Ec/Ea] (Pickett, 1956)
Vc : Çimentonun % oranı

Ec : Çimentonun elastisite modülü

Ea : Agreganın elastisite modülü



Şekil 2.8 : Agrega/çimento ve su/çimento oranlarının kuruma rötresine etkisi. (Bruno D'Souza)

2.3.4. Bazı Kimyasal Katkı Maddelerinin Rötreye Etkileri

Hava sürükleyici katkı maddelerinin rötreye doğrudan etkileri yoktur. Çalışma prensibi, beton karma işleminde oluşan hava kabarcıklarını aynı yüklü iyonlar ile yükleyip birbirlerini itmesini ve beton içinde homojen dağılmasını sağlamak olan bu katkı maddeleri yeni hava kabarcıkları üretmez, mevcut havayı homojen dağıtır. Kısacası, rijit olmayan hava kabarcıklarının rötreyi engellemesi beklenmez. (Bissonnette, 1996)

Süper akışkanlaştırıcılar rötreyi azaltıcı yönde çok fazla bir etkileri yoktur, hatta kimyasal yapıları itibariyle rötreyi arttırırlar. Ancak bunun yanında su/çimento oranını düşürdükleri için bu iki etki birbirini dengeler ve rötrede kayda değer bir değişim görülmez. (Bissonnette, 1996)

Su/çimento oranını düşüren su azaltıcı katkı maddeleri beton bünyesindeki suyu %5-12 oranında azaltabilir. Ancak, kimyasal yapısı tri-etanolamine içerdiği için bu katkılar da süper akışkanlaştırıcılar gibi rötreyi arttırma eğilimindedirler. (Bissonnette, 1996)

Son yıllarda kullanılmaya başlanan yüksek oran su azaltıcı katkı maddeleri, su oranını %12-45 düşürebildiği gibi kimyasal yapılarında rötreyi arttırıcı bir unsur yoktur. Dolayısıyla bu katkı maddeleri rötreyi azaltırlar. (Bissonnette, 1996)

Su azaltıcı-priz geciktirici katkı maddeleri, su miktarını azalttıkları gibi prizi de geciktirdikleri için düşük hidratasyon ısısı sayesinde beton içerisindeki su, betonu çabuk terk etmeyecektir böylece rötre azalacaktır. (Bissonnette, 1996)

Priz hızlandırıcı katkı maddeleri, çimentonun kimyasal reaksiyonunu hızlandırırlar. Bu da daha fazla hidratasyon ısısı açığa çıkması ve bünyeden daha fazla ve hızlı su kaybı ile sonuçlanır. Bu yüzden bu katkı maddeleri rötreyi arttırırlar. (Bissonnette, 1996)

Tablo 2.2 : Kuruma rötresine bazı katkı maddelerinin etkileri. (Bissonnette, 1996)

Katkı Maddesi	Su Azaltma % Oranı (Katkısız numuneye göre)	Su muhtevası	Kuruma Rötresi (56 günlük mikrostrain)
Su azaltıcı	5	190	550
Priz geciktirici	-	195	540
Priz hızlandırıcı	-	196	610
Su azaltıcı-Priz geciktirici	5	190	510
Su azaltıcı-Priz hızlandırıcı	5	190	570
Yüksek oran su azaltıcı	12	176	470
Yüksek oran su azaltıcı-Priz geciktirici	12	176	470
Katkısız Numune	0	200	720

2.3.5. Betonda Kürün Etkisi

Betonda kür uygulaması, plastik ve otojen rötre miktarını azaltacaktır. Ancak kuruma rötresine bir etkisi olmayacaktır. Çünkü er ya da geç betonda kür uygulaması bittiğinde kuruma rötresi başlayacaktır. Kuruma rötresinin geç başlamasını sağlamak betonda öngörülen mukavemeti elde etmek açısından çok önemlidir.

Kürü yetersiz yapılan betonda aynı zamanda rötrenin etkisiyle boşluklar birbiriyle irtibatlı hale gelebilir. Bu yüzden su/çimento oranına göre genellikle ihtiyaç duyulan kür şöyledir ; s/ç = 0,40 ise 3 gün , s/ç = 0,5 ise 14 gün , s/ç = 0,6 ise 180 gün ve s/ç = 0,70 ise 365 gün buhar kürüne ihtiyaç duyulur. (Mehta ve Monteiro , 1993)

Beton karışımındaki su miktarına ilave olarak "içsel kür" için az miktarda, ıslatılmış, hafif ve küçük agregalar veya süper emici polimer parçacıkları kullanılarak hidratasyon ısısının düşürülmesi hızlandırılır. Bu sayede daha yüksek mukavemet ve daha az otojen rötre elde edilir. Çatlaklar azalırken geçirimlilik de azalmış olur.

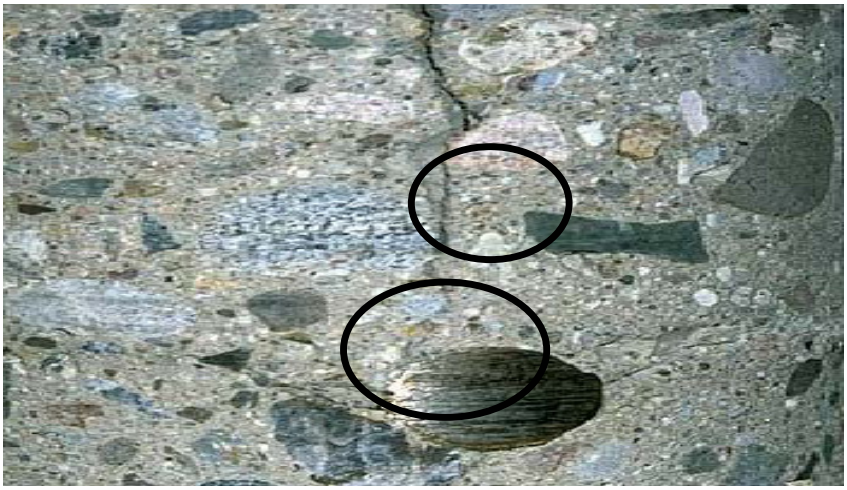
İçsel kürün iki önemli faydası vardır, birincisi; çimento hidratasyonu beton bünyesindeki suyu hemen emmeye başlar (yaklaşık 0,07 gr su / gr çimento). Hidratasyon sonucu meydana gelen bu kendiliğinden kurumanın neden olacağı su ihtiyacı özellikle düşük su/çimento oranlı betonlarda içsel kür ile karşılanabilir. İkincisi; yüksek su/çimento oranlı betonlarda geçirimliliğin hızını da etkileyen kalsiyum silikatlar zaten su miktarının fazla olması sebebiyle geçirimliliği daha yavaş azaltırlar. Bu yüzden beton dışarıdan sulandığında düşük su/çimento oranlı betonlar daha az su emerler. Bu noktada içsel kür ile düşük su/çimento oranlı betonların dışarıdan gelecek suya ihtiyaçları da azaltılmış olur. (D.P.Bentz, P.Lura, J.W.Roberts, 2005)

2.3.6. Geçirimlilik ve Porozite Etkisi

Betonun dayanımını etkileyen en önemli özelliklerden biri de 'geçirimlilik ve porozitedir. Betonun geçirimliliği ne kadar yüksekse dayanımını da o kadar düşüktür. Kuruma rötresi sırasında nem farkından dolayı beton içerisindeki suyun buharlaşıp betonu terk etme hızı geçirimlilik ile ilgilidir.

Betonun geçirimliliği çimento hamurunun, agrega ve çimento hamuru-agrega ara yüzeyinin (geçiş bölgesi) bir fonksiyonudur. Çimento hamuru genel olarak %30-40 kapiler poroziteye sahiptir. Hidratasyonu tamamlanmış %70 su/çimento oranındaki çimento hamurunun geçirimlilik katsayısı yaklaşık $6x10^{-11}$ cm/sn dir. (Uyan, 1977)

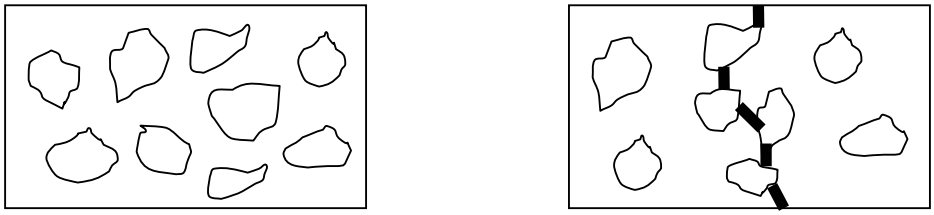
Agregalar genellikle düşük poroziteye sahiptirler (%1-3) ve nadiren %8-10 'u aşarlar. Her ne kadar geçiş bölgesinin geçirimliliği ölçülmemişse de bu bölgenin oldukça boşluklu olduğu bilinir. Kuruma rötresi sırasında çimento hamuru büzülmek isterken agregalar rijit elemanlar olarak buna engel olurlar ve bu da çimento hamuru-agrega yüzeyi arasında mikro çatlaklara neden olur. Yine terleme suyunun agrega yüzeylerine takılarak bu bölgelerde büyük boşluklar oluşturduğu da bilinmektedir.



Şekil 2.9 : Agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde çatlama.

Çok geçirimsiz agrega kullanıldığında bile çimento hamurunun geçirimliliği betonun geçirimliliğinden daha azdır. Bu da çimento hamuru-agrega ara yüzeyi geçiş bölgesinin boşluklu yapısıyla açıklanır.

Boşlukların boyutları ve dağılımı, yani birbirleriyle irtibat derecesi geçirimliliği doğrudan etkiler. Yüksek boşluklu fakat boşlukları irtibatsız bir beton, daha az boşluklu ancak boşlukları irtibatlı betondan daha geçirimsizdir.



A: Boşluklar irtibatsız. B: Boşluklar irtibatlı.

Şekil 2.10 : Betonda boşlukların irtibat derecesi.

Bir hamurun porozitesi, genellikle kür süresindeki artış ve su/çimento oranındaki azalmayla birlikte azalır. Bu durum çimentodaki C_2S ve C_3S' in oluşturduğu C-S-H jelinin hidratasyon sırasında kılcal boşlukları doldurmasına bağlıdır. Çimentoya katılacak uçucu kül, cüruf ve silis dumanı, hidratasyon ısısını düşürücü etkileri ve ince yapıları sayesinde, C-S-H jelinin aktif bir şekilde çimento hamuru-agrega arası geçiş bölgesi boşlukları doldurmasını sağlayacaktır. (Bentur ve Cohen, 1987)

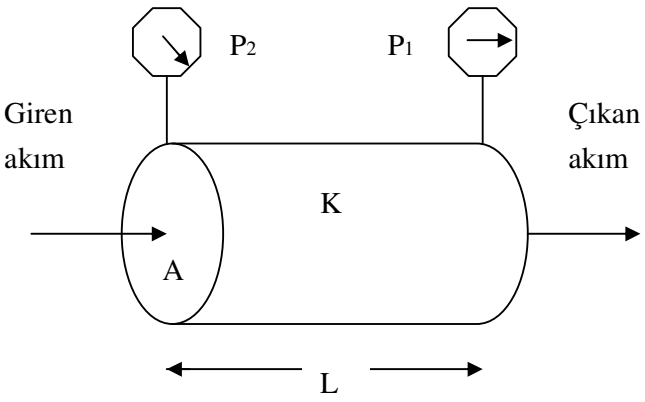
Geçirimliliği etkileyen bir başka husus da betonun yerleştirilmesidir. Vibratörle yerleştirilmiş bir betonun geçirimliliği, vibratörsüz yerleştirilmiş betondan daha az olacaktır. Şantiye uygulamalarında görülmüştür ki, perdah yapılmış bir beton, sadece vibratörle yerleştirilmiş bir betondan çok daha az geçirimliliğe sahiptir. Perdah sayesinde çimento hamuru yüzeyde iyi sıkışmış bir tabaka oluşturarak yağmur suyu gibi yüzey sularını sadece çimento hamurunun kendi geçirimliliği nispetinde geçirmiştir. Agrega zaten kendi ağırlığı ile beton içinde çökelirken üst kısımda kalan bu hamurun iyi sıkıştırılması, hem plastik rötre çatlağı oluşumunu engellemiş, hem de çimento pastası-agrega arası geçiş bölgelerini betonun doğrudan çevreyle ilişkisi olan kısmından uzaklaştırmıştır.

Rötre, bünyedeki suyun difüzyonuyla orantılıdır. Darcy kanununda ;

$$Q = K.A.(\Delta P) / (L.n) \qquad \textbf{(2.8)}$$

Birim zamanda geçen sıvı miktarı (Q), malzemenin özelliğine bağlı olan geçirimlilik katsayısı (K) ile doğru orantılıdır. Bu da betonun geçirimlilik karakteristiğinin rötre üzerindeki etkisini açıklar.

A : Katının kesit alanı (cm^2)
Q : Birim zamanda geçen sıvı miktarı (cm^3/sn)
L : Katının uzunluğu, sıvının gitmesi gereken yol (cm)
K : Geçirimlilik katsayısının özelliği (cm^2)
n : Sıvının viskoelastik özelliği
P : Basınç farkı, basıncın düşüşü P_2-P_1 ($dyne/cm^2$)



Şekil 2.11 : Darcy kanunu

2.3.7. Boyut Etkisi

Betondaki difüzyon hızının kuruma rötresi üzerindeki etkisine paralel olarak betonun boyut etkisi de yine rötre üzerinde etkili bir faktördür. Hacim / Yüzey alanı azaldıkça rötre artar. Hatta bu oranı sabit tutup, orantıdaki değerleri arttırdığımızda rötrenin daha da arttığı görülmüştür. (Bissonnette, 1996)

Denklem (2.8)' de yüzey alanı (A) ve betonun kalınlığı (L)' nin geçirimliliğe (Q) nasıl etki ettiği görülmektedir. Beton kalınlığı azaldıkça iç ısı ve nem, ortamın nemiyle daha çabuk dengeye ulaşır. Bunun sonucu olarak hem plastik hem de kuruma rötresi çatlakları artar.

Kütle betonlarında ise tam tersine betonun iç kısımlarında, kalınlıktan dolayı, ortamla ısı alış verişi çok yavaş olacağı için hidratasyon ısısının priz süresince artışı, beton yüzeyinde ortamla ciddi ısı farkı oluşturacaktır. Bunun sonucu olarak yüzeydeki hızlı buharlaşma plastik rötre çatlaklarına sebep olacaktır.

2.3.8. Bağıl Rutubet Etkisi

Nem'in rötre üzerindeki etkisi diğer faktörlerden biraz farklıdır. Çünkü diğer etkenler kontrol altında tutulup betonun tasarım aşamasında müdahale edilebilirken nem, kür bittikten sonra müdahale edilemeyen bir parametre olarak kalır.

Deneysel çalışmaların sonucunda havadaki nemin betondaki neme oranı %94'den az ise betonda rötre başlar. Bu oran %100 olduğunda ise tam tersi bir durum yani betonda genleşme gözlenir. (Neville, 2000)

3. RÖTRE HESABI

3.1. TS500'e Göre Birim Rötre Deformasyonu Hesabı

TS500'de betonun kesit alanı, ortama açık yüzeylerinin boyutu, numunenin yaşı ve ortamın nemi göz önünde bulundurularak hazırlanmış rötre katsayısı çizelgesi vardır. Avrupa Beton Komitesi Model Yönetmeliği (CEB-78)'den aktarılmış bu çizelge, betonun geçirimliliği, su/çimento oranı gibi rötreye etki eden diğer faktörler göz önünde bulundurulmadığından yaklaşık bir yöntem olarak kabul edilir. (Ersoy, 1985)

Tablo 3.2: Rötre Katsayısı ε_{cs}

Büzülme, ε_{cs}	Nemli ortam, bağıl nem %75		Kuru ortam, bağıl nem %55	
Betonun yaşı	$\ell_e < 200$ mm	$\ell_e > 600$ mm	$\ell_e < 200$ mm	$\ell_e > 600$ mm
3 - 7 gün	0,00026	0,00020	0,00043	0,00030
7 - 60 gün	0,00023	0,00020	0,00032	0,00030
60 günden fazla	0,00016	0,00020	0,00019	0,00028

$$\ell_e = 2.Ac / u \qquad \textbf{(3.1)}$$

ℓ_e : Eşdeğer kalınlık
Ac : Elemanın kesit alanı
U : Betonun ortama açık yüzeylerinin kesitteki çevre uzunluğu

3.2. Birim Rötre Deformasyonu Hesabı İçin Diğer Bir Yöntem

Belirli bir 't' zamanı sonunda oluşacak rötre deformasyonu hesabı için gerekli büzülme katsayısı ε_{cs}, aşağıdaki bağıntılardan bulunabilir. (Ersoy, 1985)

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{s1} . \varepsilon_{s2} . \beta_s \qquad \textbf{(3.2)}$$

ε_{cs} : Büzülme katsayısı

ε_{s1} : Tablo 3.2.' den alınacak katsayı

ε_{s2} : Eşdeğer kalınlık (le)' ye bağlı bir katsayı. Tablo 3.3 den alınacak.

β_s : Eşdeğer kalınlık ve zamana bağlı bir katsayı. Tablo 3.4' den alınacak.

ℓ_e : Eşdeğer kalınlık, Denklem (3.1)'den alınacak.

Tablo 3.4' deki zaman, betonun içinde bulunduğu ortamın sıcaklığının 20℃ olduğu kabulüne göre tanımlanmıştır. Sıcaklığın 20℃ den farklı olduğu durumlarda betonun yaşı Denklem (3.3) kullanılarak hesaplanabilir.

$$t = (T+10).\Delta t / 30 \qquad \textbf{(3.3)}$$

t : Etkili yaş

T : Δt zaman içindeki ısı (℃)

Δt : Betonun söz konusu ortamda bulunduğu süre (gün)

Etkili kalınlık le, Denklem (3.1)' den daha doğru olarak hesaplanabilir.

$$\ell_e = \lambda.2.Ac / u \qquad \textbf{(3.4)}$$

λ : Ortamın nemine bağlı katsayı (Tablo 3.2)

Tablo 3.2: λ ve ε_{s1} katsayıları

Ortamın Nemi	Bağıl Nem %	Büzülme Katsayısı ε_{s1}	Kalınlık ile ilgili katsayı λ
Su içinde	100	+0,00010	30
Çok nemli	90	-0,00013	5
Normal	70	-0,00032	1,5
Kuru	40	-0,00052	1

Tablo 3.3: ε_{s2} katsayısı

Büzülme ε_{s2}	Etkili Kalınlık ℓ_e (mm)					
	50	100	200	400	800	>1500
ε_{s2}	1,2	1,05	0,9	0,8	0,75	0,7

Tablo 3.4: βs katsayısı

β_s katsayısı	Zaman							
	5 gün	10 gün	1 ay	2 ay	3 ay	1 yıl	2 yıl	3 yıl
ℓ_e = 50 mm	0,30	0,36	0,55	0,68	0,75	0,90	0,94	0,97
ℓ_e = 100 mm	0,16	0,22	0,40	0,52	0,60	0,84	0,90	0,93
ℓ_e = 200 mm	0,07	0,10	0,21	0,32	0,40	0,65	0,80	0,87
ℓ_e = 400 mm	0,02	0,04	0,10	0,18	0,22	0,45	0,60	0,70
ℓ_e = 800 mm	0	0,01	0,03	0,07	0,10	0,20	0,35	0,45
ℓ_e > 1500 mm	0	0	0,01	0,02	0,04	0,10	0,18	0,23

Örnek : 10x10x50 cm numune 20 ℃ sabit sıcaklıkta ve kuru ortamda (%40 nem) bir ay sonunda yapacağı yaklaşık birim rötre deformasyonu.

$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{s1} . \varepsilon_{s2} . \beta_s$

ℓ_e = λ.2.Ac / u

λ = 1,0 (Tablo 3.2)

A_c = 100x100 = 10.000 mm²

U = 100x3 = 300 mm

ℓ_e = 1,0x2x10.000/300 = 66,66 mm

ε_{s1} = -0,00052 (Tablo 3.2)

ε_{s2} = 1,15 (Tablo 3.3'den enterpolasyon)

β_s = 0,50 (Tablo 3.4'den enterpolasyon)

Buna göre ; ε_{cs} = (-0,00052)x1,15x0,50

ε_{cs} = -0,000299 bulunur.

$\varepsilon = \Delta\ell / \ell$ ise $\Delta\ell$ = -0,000299x50 cm = 0,01495 cm boy kısalması beklenir.

3.3. Amerikan Beton Enstitüsü – ACI 209 Code Model (Bhal,1995, Bhal,1996, Mehta,1986)

$$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,o}) = \frac{(t - tsh, o)}{35 + (t - tsh, o)}\ \varepsilon_{sh\infty}\ \text{(nem/kür)}$$

$$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,o}) = \frac{(t - tsh, o)}{55 + (t - tsh, o)}\ \varepsilon_{sh\infty}\ \text{(buhar/kür)}$$

$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,o})$: Birim rötre deformasyonu

t : Zaman (gün)

$t_{sh,o}$: Kuruma başlangıç zamanı (gün)

$\varepsilon_{sh\infty}$: Son birim rötre deformasyonu

3.4. Bazant B3 Model (Bazant, 1995)

$$\varepsilon_{sh}(t, t_o) = -\varepsilon_{sh\infty}.K_h.S(t)$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = -\alpha_1.\alpha_2.(26.(w)^{2,1}.(f_c)^{-0,28}+270)*10^{-6}$$

$$K_h = 1-h^3$$

$$S(t) = \tan(h)\sqrt{\frac{(t - to)}{Tsh}}$$

$\varepsilon_{sh}(t, t_o)$: Birim rötre deformasyonu

$\varepsilon_{sh\infty}$: Son birim rötre deformasyonu

α_1 ve α_2 : 1,0

f_c : 28 günlük basınç mukavemeti (psi)

w : Su muhtevası (lb/ft^3)

K_h : Kesit faktörü

h : Bağıl nem

t : Betonun yaşı (gün)

t_0 : Rötre başlangıcında betonun yaşı

S(t) : Rötre için zaman fonksiyonu

3.5. Avrupa-Uluslararası Beton Komitesi – CEB 90 Code Model (Bhal, 1995, Bhal, 1996, Mehta, 1986)

$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_{s}.(f_{cm}).(\beta_{RH})$

$\varepsilon_{s}.(f_{cm}) = (160+10\beta_{sc}.(9- f_{cm}/1450))*10^{-6}$

$\beta_{RH} = -1{,}55.\ \beta_{ARH}$

$\beta_{ARH} = 1-(RH/1000)^3$

ε_{cso} : Portland çimentosunun kuruma rötresi

ε_{s} : Bağıl rutubet-Rötre tablosundan elde edilen kuruma rötresi

β_{sc} : Çimento tipine bağlı katsayı

β_{RH} : Bağıl rutubet için katsayı

f_{cm} : 28 günlük basınç dayanımı (psi)

3.6. Sakata Model (Sakata, 1993)

$\varepsilon_{sh}(t,t_o) = \varepsilon_{sh\infty}\ [1-\exp(-0{,}108(t-t_0)^{0,56})]$

$\varepsilon_{sh\infty} = -50+78(1-\exp(RH/100)+38(\ell n(w)) - 5(\ell n(V/S)/10)^2 * 10^{-5}$

$\varepsilon_{sh}(t,t_o)$: Öngörülen birim rötre deformasyonu (in./in.)

$\varepsilon_{sh\infty}$: Son birim rötre deformasyonu (in./in.)

w : Betondaki su muhtevası (kg/m^3)

RH : Bağıl rutubet (%)

V/S : Hacim/Yüzey alanı oranı

t : Zaman (gün)

t_0 : Rötre başlangıç zamanı (gün)

3.7. Gardner/Lockman Model (Gardner, 1998)

$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{shu}.\ \beta_{(h)}.\ \beta_{(t)}$

$\varepsilon_{shu} = 1000*K*\left(\frac{4350}{f_{cm28}}\right)^{1/2} *10^{-6}$

$\beta_{(h)} = 1-(1{,}18.h^4)$

$\beta_{(t)} = \left(\frac{(t-t_c)}{t-t_c+97(V/S)^{1/2}}\right)*10^{-6}$

ε_{sh} : Birim rötre deformasyonu (in./in.)

ε_{shuu} : Son birim rötre deformasyonu (in./in.)

$\beta_{(h)}$: Rutubetin rötre üzerinde etkisi

$\beta_{(t)}$: Zamanın rötre üzerinde etkisi

h : Rutubet

t_c : Kuruma yaşı (gün)

t : Betonun yaşı

K : Çimento tipinin rötre üzerinde etkisi

4. RÖTRE AZALTICI KATKI MADDELERİ (SRA)

4.1. Kimyasal Yapısı

Rötre azaltıcı katkı maddeleri ilk olarak 1982 yılında Japonya'da geliştirilerek 1985 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde patent aldı. Kimyasal olarak iki grup SRA mevcuttur. Neopentil-glycol [$(CH_2)_2$ – C – $(CH_2\text{-}OH)_2$] veya propylen-glycol [(CH3 - CH2 - CH – (CH2 – OH)2]

4.2. SRA-Su Karışımının Yüzey Gerilimi

Düşük viskoziteye sahip olmaları bu katkı maddelerin en önemli özelliğidir. Suya %1 oranında SRA eklentisi ile Su-SRA karışımının yüzey geriliminde %30'luk bir azalma görülür. SRA'nın %15 oranında eklentisinin yüzey geriliminde %54'e varan bir azalma sağladığı şekil 4.1 de görülmektedir. (Ai and Young 1997)

Yüzey gerilimini tanımlamak için Adamson tarafından yarı ampirik bir denklem geliştirilmiştir. (Adamson, 1990)

$$\gamma_{KARIŞIM} = \gamma_{SU} [1 - \delta . \ln (C_{SRA} / \Phi)] \quad \text{eğer } C_{SRA} < 15 \qquad \textbf{(4.1)}$$

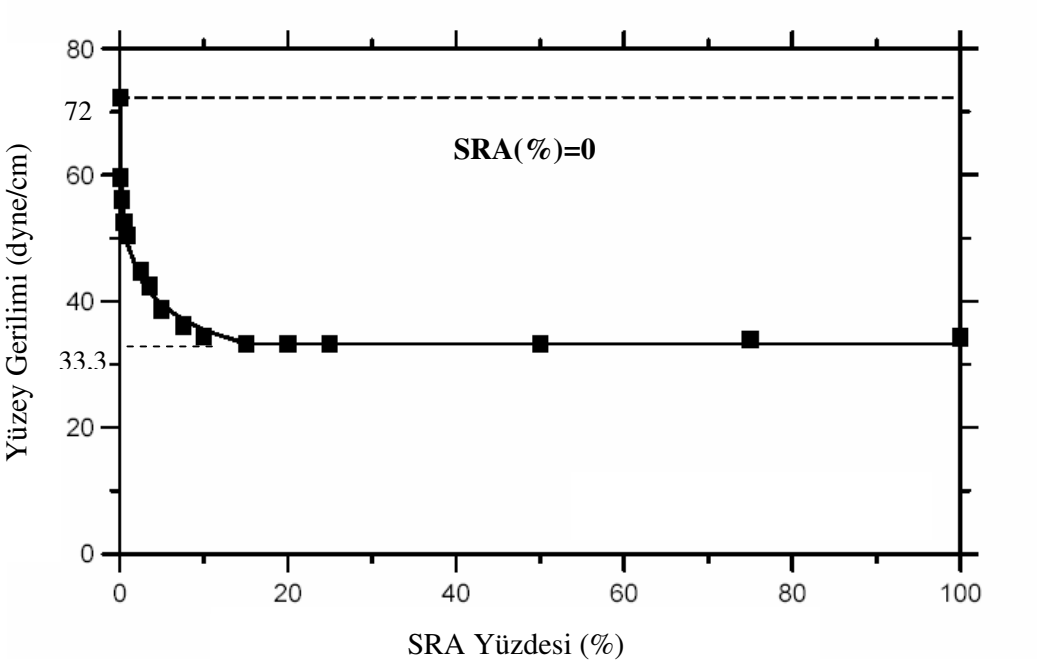
$$\gamma_{KARIŞIM} = 33.3 \text{ eğer } C_{SRA} > 15 \qquad \textbf{(4.2)}$$

γ : Yüzey gerilimi (dyne/cm)

C_{SRA} : Karışımdaki SRA yüzdesi

δ : SRA ile ilgili katsayı (0,0795 alınabilir.)

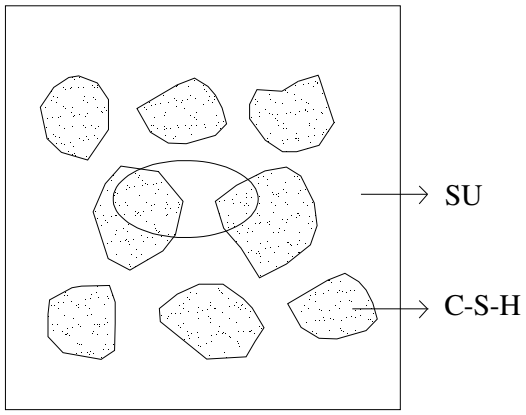
Φ : SRA ile ilgili katsayı (0,0164 alınabilir.)



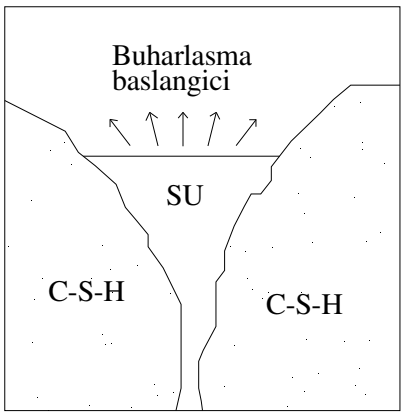
Şekil 4.1: SRA eklentisinin suyun yüzey gerilimine etkisi

4.3. SRA'nın Çalışma Mekanizması

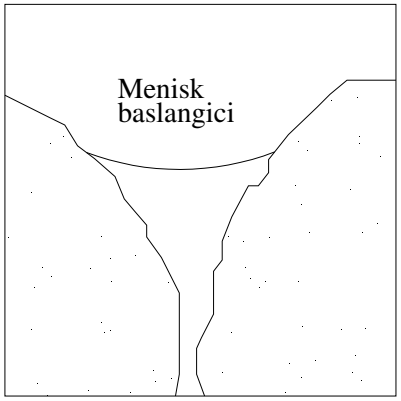
Beton bünyesinden dışarı çıkması en kolay suyun kapiler boşluklardaki su olduğu daha önce 2.3.2 de anlatılmıştı. Kapiler gerilmelerin etkisiyle su yüzeyinde oluşan menisk hali, aşağı doğru basınç etkisi yaparak içerideki suyun dışarı çıkışını hızlandırır. (Şekil 4.2.a, b, c, d) Boşluklardaki suyun çıkışıyla C-S-H taneleri birbirlerine yaklaşmaya başlar (Şekil 4.2.e). İyice yaklaşan C-S-H taneleri belirli bir mesafeden sonra Van der Walls bağları etkisiyle bu çekim kuvvetini iyice arttırarak birbirleri arasındaki mesafeyi çok hızlı bir şekilde daraltmaya devam ederler (Şekil 4.2.f). Birbirini takip eden bu seri olayları SRA, birinci adımda, düşük viskozitesi sayesinde sudaki kapiler gerilmelerin oluşumunu azaltarak kontrol altında tutar. Böylece C-S-H tanelerinin birbirlerine yaklaşma mesafesi korunmuş olur.



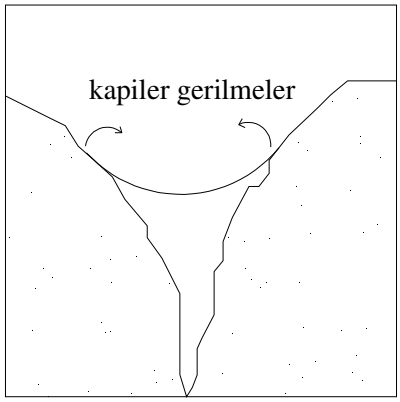
a : C-S-H taneleri ve kapiler su



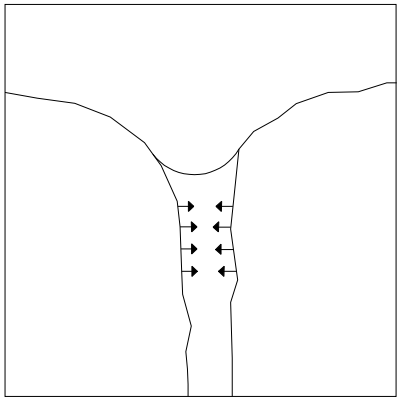
b : Buharlasma baslangici



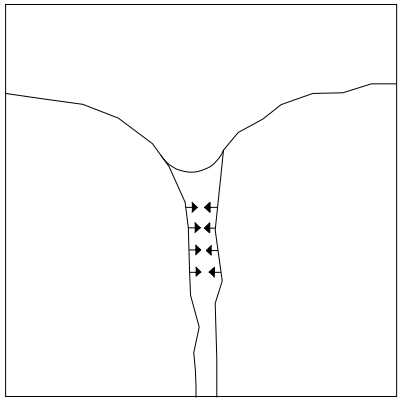
c : Menisk baslangici



d : Kapiler gerilmeler baslangici



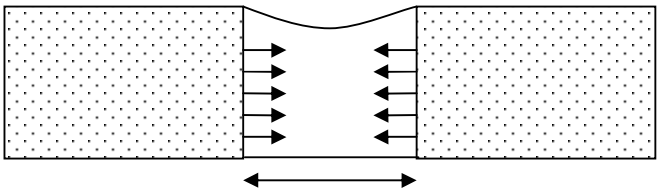
e : C-S-H taneleri yaklasiyor



f : Çok yaklasan C-S-H taneleri arasinda Van der Walls çekim kuvveti olusumu

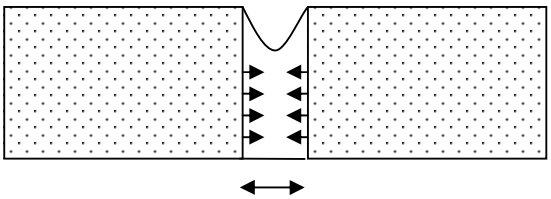
Şekil 4.2: C-S-H taneleri arası çekim kuvveti

Büyük kapiler boşluklardaki suyun önce boşalmasına karşın, küçük kapiler boşluklarda daha büyük gerilmeler oluşur. Yani boşluk küçüldükçe daha az su kaybı olmasına rağmen daha fazla rötre oluşur. (L' Hermite, 1960)



R=1 mic.

A. Orta derece kuruma



R=0,1 mic.

B. Yüksek derece kuruma

ŞEKİL 4.3 : Menisk halinin , kapiler çekme kuvveti ve bloklar arası mesafeye etkisi.

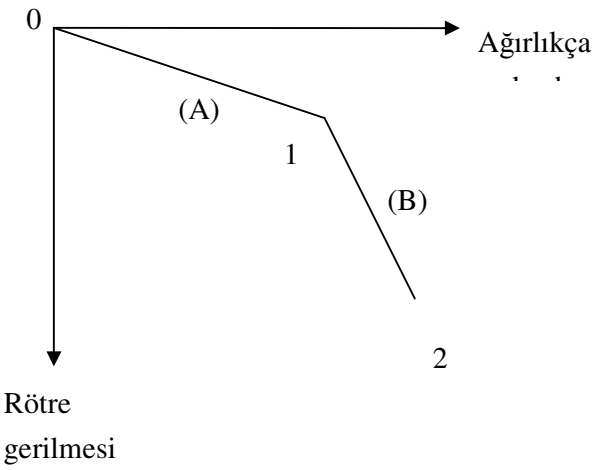
Gelişen kapiler basıncın büyüklüğü (Pc) ; sıvının yüzey gerilimine (γ), eğrinin yarıçapına veya kılcal boşluk yarıçapına (r), katı ile sıvının denge açısına (θ) bağlıdır.

$$Pc = 2.\gamma.Cos(\theta) / r \qquad \textbf{(4.3)}$$

Sıvının tamamen blokları ıslattığı kabul edilirse ($\theta = 0$), denklem (4.3) şu şekilde basitleştirilebilir ;

$$Pc = 2. \gamma / r \qquad \textbf{(4.4)}$$

Denklem (4.4) de kapiler gerilme (Pc) ile kılcal boşluk yarıçapı (r) birbiriyle ters orantılı olduğu görülmektedir. Şekil 4.4 de (1-2) arası bölgede daha az su kaybı olmasına rağmen boşluk yarıçapının azalmasıyla kapiler gerilmeler daha fazla rötreye neden olur.



Şekil 4.4 : Rötre gerilmesi-Ağırlıkça su kaybı arası ilişki. (Le' Hermite, 1960)

Şekil 4.4 deki (0-1) bölgesi, Şekil 4.3 deki A(orta derece kuruma) bölgesini, (1-2) bölgesi ise B(yüksek derece kuruma) bölgesini göstermektedir.

Şekil 4.4 ün (1-2) kısmında, çimento hamuru tanelerinin birbirleri arasındaki çekimi, kapiler gerilme kuvvetinden başka, ilave olarak arttıran bir başka kuvvet de Van der Walls bağlarıdır. (Powers, 1968-1969)

Menisk halinin arttırdığı kapiler basınçla beraber çimento hamuru taneleri (0-1 aralığında) önce birbirlerine yaklaşmaya başlarlar. Birbirlerine yaklaşan çimento taneleri belirli bir mesafeden sonra o kadar yaklaşmış olurlar ki, kapiler basınca ilave olarak Van der Walls bağlarının çekim kuvveti de bu yakınlaşmadan dolayı devreye girer. Çimento taneleri birbirlerine bu aşamada (1-2 aralığı) hem kapiler gerilmelerin oluşturduğu kuvvetle, hem de Van der Walls çekim kuvvetiyle hızla yaklaşırlar. Bu da 1-2 kısmında daha az su kaybıyla daha çok rötre miktarı teorisini açıklar.

Young'a göre meniskler kapiler boşluk çapları 2,5 nm den küçük, 50 nm den büyük olduğunda oluşamaz. Bağıl nem %40 dan az olursa yine menisk formu oluşamaz. Çünkü kuru ortamda su yeterli menisk yarıçapına ulaşıp CSH jel çeperlerine tutunamaz ve çekim kuvveti oluşturamaz. (Young, 1986)

Kelvin bu durumu denklem 4.5 ile şöyle açıklamıştır.

$$-\ell n(RH) = \frac{2.\gamma.(Cos\theta).\mu}{r.R.T.\rho} \quad \textbf{(4.5)}$$

RH : Bağıl rutubet

γ : Suyun yüzey gerilimi (72 dyne/cm)

CosØ : Katı ve su arasında temas açısının kosinüsü

μ : Suyun moleküler ağırlığı (18 g/mol)

r : Kapiler boşluk yarıçapı

R : Uluslar arası gaz sabiti (8,315 J/g.mol.°K)

T : Mutlak sıcaklık °K (298 K°)

ρ : Suyun öz kütlesi (1 g/ml)

Kelvin denklemi ile ıslatma açısını Ø=0 kabul ederek %43 bağıl neme karşılık gelen kapiler boşluk yarıçapı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$\ell n(43)$ = -2.(72 dyne/cm).(1).(18 g/mol) / [(r).(8,315 j/g.mol °K).(298 °K).(1 g/ml)]

r = 1,24 nm ise boşluk çapı R = 2,48 nm bulunur. Yani yaklaşık 2,5nm den küçük kapiler boşluklarda menisk oluşamaz.

Kelvin denklemi ile R = 50 nm büyüklüğünde bir kapiler boşluk için bağıl nemi hesaplarsak RH = %96 bulunur. Bu da suya doygun bir kapiler boşluk demek olacağından menisk oluşması yine beklenmez.

Denklem (4.4) de bahsedilen Pc = 2. γ / r denklemine göre suyun yüzey gerilimi (γ) SRA sayesinde düşer, bu da kapiler basıncın (P_c) düşmesini sağlar. Denklem 4.1 ve Denklem 4.2 ile birlikte düşünüldüğünde karışıma eklenecek % SRA miktarının Kapiler gerilmeyi ne kadar azaltacağı hesaplanabilir.

Örneğin beton karışımına %1 oranında SRA eklenmesi durumunda; $C_{SRA} = 1 < 15$

$\gamma_{KARIŞIM} = \gamma_{SU}\,[1-\delta.\ \ell n\,(C_{SRA} / \Phi)]$ eğer $C_{SRA} < 15$ (Denklem 4.1)

$\gamma_{KARIŞIM} = \gamma_{SU}\,[1-0{,}0795.\ \ell n\,(1/0{,}0164)]$

$\gamma_{KARIŞIM} = \gamma_{SU}.(0{,}67)$ bulunur.

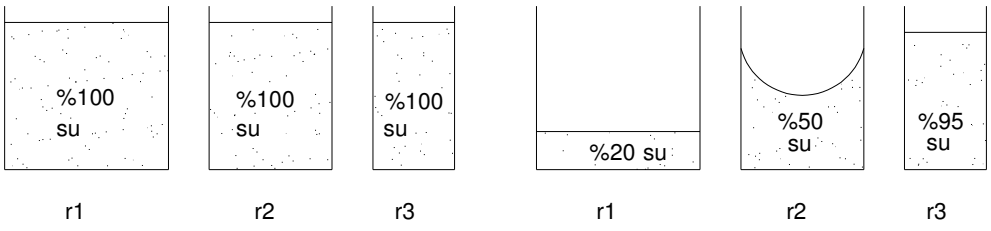
Beton karışımına %1 oranında SRA eklenmesi durumunda kapiler gerilmede (P_c) yaklaşık %33 oranında bir azalma meydana gelir.

4.4. SRA' nın Buharlaşmaya Etkisi

SRA'nın suyun buharlaşma hızına bir etkisi yoktur. Yapılan deneyde SRA katılmış ve katılmamış su numunelerinin buharlaşma sürelerinde kayda değer bir fark görülmemiştir. Ancak beton karışımında SRA, suyun buharlaşma hızını, menisk çapını azalttığı için, azaltır. Suyun yavaş buharlaşması sebebiyle SRA kullanılmış betonun iç ısısında bir miktar artış olur. (Lura, Mazotta, Rajabipour, Weiss, 2005)

SRA katkı maddeleri beton ve harçlarda kuruma rötresini azaltmalarına karşın bazı durumlarda buharlaşmayı arttırabilirler. (D.P.Bentz, 2006)

Laboratuvar koşullarında sabit nem oranında kurumaya bırakılan beton veya harç numunelerde içsel rutubet, ortamın nemiyle dengeye ulaştığında sabit bir rutubet oranı elde edilmiş olur. Denklem 4.5'de Kelvin'e göre -ℓn(RH) sabit tutulduğunda kapiler boşluklardaki sıvının yüzey gerilimi ($\gamma_{KARIŞIM}$) azaldıkça kapiler boşluk yarıçapı (r) da azalır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta, bahsedilen boşlukların son kuruma değerine erişmiş, yani ortamın nemi ile numune içi nemin dengeye ulaşmış olmasıdır. Kurumuş kapiler boşlukların yarıçapı (r) küçüldükçe, o numunede buharlaşma da fazla olmuş demektir. Çünkü buharlaşma boşluk çapı küçüldükçe zorlaşır.



Şekil 4.5: Boşluk çapına göre suyun buharlaşma hızı.

Mac Kenzie denklemiyle (Denklem 4.7) yine buharlaşmanın sabit bağıl nem oranında daha fazla olduğu görülebilir. Denklem 4.4 ve Denklem 4.5'i birlikte düşünürsek aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\text{Pc} = \frac{2.\gamma.(Cos\theta)}{r} = \frac{-\ell n(RH).R.T}{\mu} \qquad \textbf{(4.6)}$$

Eşitliğin sağ tarafında -ℓn(RH) sabit tutulduğunda R,T ve μ sabit olduklarından kapiler gerilme (Pc) de sabit olur.

$$\varepsilon = \frac{S.Pc}{3}.\left(\frac{1}{K} - \frac{1}{Ks}\right) \qquad \textbf{(4.7)}$$

ε : Birim Deformasyon (mm/mm)

S : Kapiler boşluk doluluk oranı (0-1)

K : Kapiler boşluk kuru halde iken boşluk malzemesinin bulk modülü.

Ks : Kapiler boşluk malzemesinin iskeletinin bulk modülü.

SRA eklentisi deformasyonu (ε) azaltır. Kapiler gerilmenin (Pc) sabit olduğu denklem 4.7'de deformasyon (ε) azalırken, doluluk oranı (S) de azalır. Yani SRA kullanılmamış beton ve harçlara göre SRA kullanılmış numunelerde daha fazla buharlaşma gerçekleşmiştir.

Numunelerin iç rutubeti, bekletildikleri ortamın rutubetine göre çok fazla olduğu durumlarda, özellikle harç ve çimento hamurunda kuruma çok yavaş gerçekleşir. Buharlaşmanın yavaş olduğu kapiler boşlukların doluluk oranı (S) da fazladır. Mac Kenzie Denklemi (4.7)' ne göre doluluk oranı (S) artışı, Pc kapiler gerilmeleri azaltır. Yine Kelvin Denklemi (4.6)' ne bakıldığında kapiler gerilmelerin (Pc) azalışının iki nedenini görebiliriz. Birincisi; SRA eklentisi boşluklardaki sıvının yüzey gerilimini (γ) azaltır, bu yüzden kapiler gerilmeler (Pc) azalır. İkincisi; doluluk oranı (S) artışı boşluk yarıçapını (r) arttırır. Çünkü büyük boşlukların hala doluluk oranı fazladır. Bu yüzden Denklem 4.6 da kapiler gerilmelerin (Pc) azalışı, eşitliğin sağ tarafındaki ln(RH) değerinde bağıl nemi arttıracaktır. Böylece numune içi rutubetin, ortamın rutubetine göre çok yüksek olduğu durumlarda SRA eklentisi buharlaşmayı azaltır.

Sonuç olarak beton veya harç numunelerin iç rutubeti, bekletildikleri ortamın rutubetine göre çok düşükse SRA eklentisi buharlaşmayı arttırır. Tam tersi durumda yani numunelerin iç rutubetinin ortamın rutubetine oranı çok yüksekse SRA eklentisi buharlaşmayı azaltır.

Kendiliğinden kurumaya etkisini gözlemlemek için numune ile ortam arasında nem transferini engellemek gerekir. Bu da Kelvin (4.6) ve Man Kenzie (4.7) denklemlerindeki kapiler boşluk yarıçapı (r) ve doluluk oranı (S)'nın sabitler. Buna göre suyun yüzey gerilimi (γ), SRA sayesinde azalırsa kapiler gerilme (Pc) azalır ve buna bağlı olarak deformasyon (ε) yani otojen rötre de azalır.

4.5. Uyumluluk ve Mekanik Özelliklere Etkileri

Rötre azaltma katkıları alışılmış tüm hava sürükleyici katkı maddeleri, orta düzey su azaltıcılar, süper akışkanlaştırıcılar, priz geciktiriciler, priz hızlandırıcılar, silis dumanına katkılar ve korozyon inhibitörü katkılarla uyumludur. Dikkat edilmesi gereken husus, diğer katkı maddeleriyle karıştırmadan betona ilave edilmelidir.

Rötre azaltıcı katkı maddeleri yapılarında su içermezler ancak beton karışımına katılım miktarı kadar su ile eşdeğer çökme değeri sağlarlar. Yani SRA kadar su, beton karışımından eksiltilebilir.

SRA içeren betonların yerleşme sürelerinde bir miktar gecikme olabilir. Çünkü, SRA'nın suyun yüzey gerilimini düşürmesiyle, menisk formunun konsolide etkisinde bir azalma olmuştur. Buna bağlı olarak betonun mekanik özelliklerini kazanma süresi de uzayacaktır. (Brad Pease, Hardik Shah ve Jason Weiss, 2005)

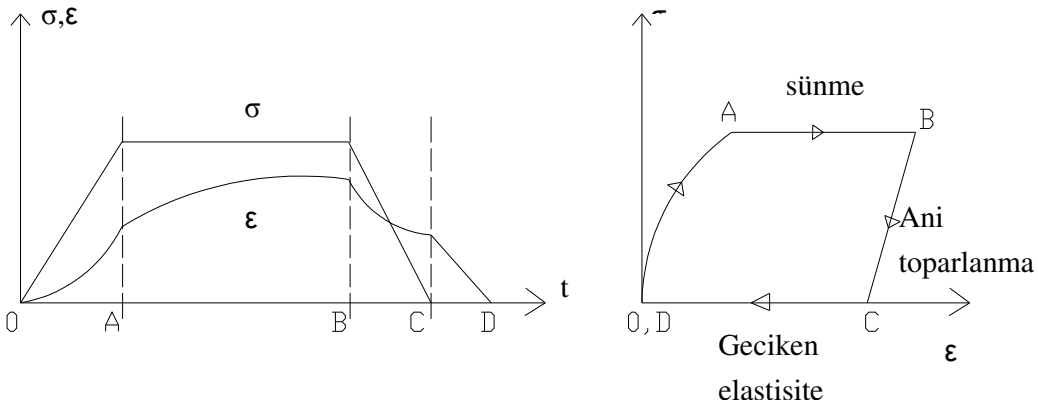
SRA'nın bir diğer etkisi betonun basınç dayanımında %0 ile %15 oranında bir azalmaya neden olmasıdır. Bu etkiyi bertaraf etmek için yüksek oran su azaltıcı katkı maddeleri kullanılabilir. Böylece bünyedeki su miktarı azaltılarak daha fazla dayanım elde edilebilir. (Grace Ürün Kataloğu, 2006)

Yapılan bir deneysel çalışmada su/çimento oranı 0,40 olan %1 ve %2 rötre azaltıcı katkı maddesi kullanılmış beton numuneler ile bunları kontrol amaçlı üretilen katkısız beton numuneler 28 gün suda bekletilmiştir. Kür sonunda numunelerin deformasyonları ölçüldüğünde SRA kullanılmış numuneler, katkısız numunelere göre yaklaşık 3 kat daha fazla genleşmiştir. Hatta %2 SRA katkılı numuneler de %1 SRA katkılı numunelere göre %11 daha fazla genleşmiştir. Daha sonra kurumaya bırakılan numunelerin yine 28 günlük deformasyonlarına bakıldığında SRA kullanılmış numunelerin deformasyonlarının 28 günlük kür ve 28 günlük kuruma sonunda mutlak değerce neredeyse aynı oldukları görülür. Ancak katkısız numuneler aynı süre içerisinde mutlak değerce neredeyse 10 kat daha fazla rötre deformasyonu yapmışlardır. (Edificio, Jordi Girona, Gettu, 2003)

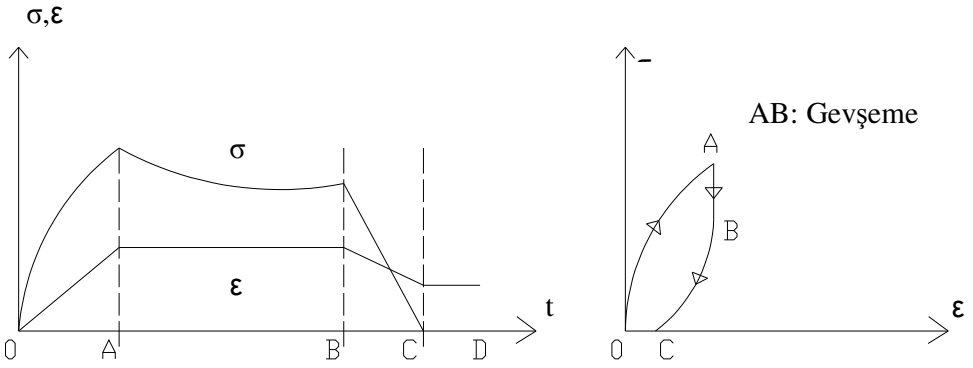
4.6. Sünmeye Etkisi

4.6.1. Sünme

Sabit gerilme altında deformasyon zamanla devam ediyorsa bu olaya sünme denir. Diğer yandan gerilme azalırken deformasyon sabit kalıyorsa bu durum gevşeme'dir.



Şekil 4.6 : Gerilme-Birim Deformasyon-Zaman grafiğinde sünme.



Şekil 4.7 : Gerilme-Birim Deformasyon-Zaman grafiğinde gevşeme.

Sünme, betonarme yapı elemanlarında bazı olumsuz etkilere neden olabilir. Örneğin, mesnet çökmesi ve öngermeli yapı elemanlarında öngerme kaybı gibi istenmeyen durumlar meydana gelebilir. Öte yandan sünmenin olumlu etkileri de vardır; rötre gerilmelerinin, sıcaklık artışının veya herhangi bir yükün sebep olabileceği ilave gerilmeler, sünme deformasyonu sayesinde azalır.

Birim deformasyon (ε) genellikle normal betonlar için 200 ile 1200 μm/m arasındadır. Sünme deformasyonu ise 60-200 μm/m/MPa arasındadır. Yani sünme

deformasyonu yaklaşık olarak rötre deformasyonunun %30'u kadardır. Bu yüzden rötre deformasyonu yapması engellenmiş betonlarda sünme, içsel çekme gerilmelerini rahatlatıp çatlak oluşumunu azaltacaktır. (Neville,2000)

Genellikle betonun mekanik özellikleri arttıkça sünme eğilimi azalır. Yani su/çimento oranı artışı betonda sünmeyi arttırır. Çünkü agregalar rijit elemanlar oldukları için deformasyonu çimento pastasının viskoz özelliği gerçekleştirecektir. Aynı şekilde kür süresince betonda genleşme olacağı için sünme azalır. Ancak burada sünmenin beton için faydalı olduğunu söylerken su/çimento oranı yüksek veya daha düşük zamanlı kür uygulanmış betonlar tercih edilmelidir anlamı çıkarılmamalıdır. Beton tasarımında yüksek mukavemet değerleri için betonun zamana bağlı davranışı, yani dayanımı göz ardı edilmemelidir. (Bissonnette,1996)

4.6.2 Sünme Deformasyonu Hesap Yöntemi

$$\varepsilon_{c,tension} = \varepsilon_{total} - (\varepsilon_{\varepsilon l} - \varepsilon_{fs}) \quad \textbf{(4.8)}$$

$$\emptyset_{c,tension} = \frac{\varepsilon_{c,tension}}{\varepsilon_{\varepsilon\ell}} \quad \textbf{(4.9)}$$

$\emptyset_c$: Sünme katsayısı

ε_c : Çekme sünmesi birim deformasyonu

$\varepsilon_{\varepsilon l}$: İlk ani deformasyon (yüklenen numunede)

ε_{fs} : Rötre Deformasyonu (serbest kontrol numunesinde)

ε_{total} : Toplam Birim Deformasyon (yüklenen numunede)



Tutulmuş numune $\delta=0$ Serbest numune $\delta>0$

Şekil 4.8 : Sünme deneyinde tutulmuş ve serbest numune.

4.6.3 Rötre Azaltıcı Katkı Maddesi'nin Sünmeye Etkisi

Rötre azaltıcı katkı maddesi, suyun yüzey gerilimini azaltıcı etkisi sayesinde kapiler boşluklarda kapiler çekme gerilmeleri oluşumunu azaltır. Bu sayede sünmeye neden olacak gerilmeler azalmış olacağı için sünme de azalır. Yapılan deneyde SRA kullanımının %36 birim rötre deformasyonunu azaltması ile birlikte sünmeyi de %29 azalttığı gözlenmiştir. (M.D.D'Ambrosia, S.A.Altoubat, C.Park, D.A.Lange,2001)

4.7. Uygulama Şekilleri ve Kullanım Alanları

Beton karışımına çimento ağırlığının %1-2'si oranında doğrudan katılabileceği gibi SRA'nın yüzeysel uygulaması da vardır. Fırça ile beton yüzeye 100-300 ml/m² SRA sürülerek rötre miktarı azaltılabilir. Ancak bu uygulama için beton prizini tam olarak almamış olmalı ve hava koşulları da uygun olmalıdır. Yani açık alanda çok sıcak ve rüzgârlı bir havada uygulama yapmanın fazla bir yararı olmayacaktır. Yüzeysel SRA uygulaması, karışıma katılan SRA kadar etkili olmasa da su/çimento oranının %45 den fazla olduğu betonlarda etkin sonuçlar verir. (Bruno D'Souza, 2005)

Rötre azaltıcı katkı maddeleri, en çok kuruma rötresinden kaynaklanan çatlakların hüküm sürdüğü ve etkilerinin kötü olduğu yapılarda kullanılır. Bunlardan bazıları, köprü tabliyeleri, otoparklar, deniz yapıları, yüksek performanslı betonarme katlar ve içme suyu depolama yapılarıdır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

5.1.1. Agrega

Kullanılan agregaların özgül ağırlıkları kırma taş-2: 2,72 g/cm³, kırma taş-1: 2,72 g/cm³, kırma kum: 2,71 g/cm³, doğal kum: 2,65 g/cm³' dür.

B32 standardına yakın olacak şekilde agreganın granülometrisi %30 Kırmataş-2, %21 Kırmataş-1, %26 Kırmak kum ve %23 Doğal kum olarak belirlendi.

5.1.2. Çimento

PÇ 42,5 ve özgül ağırlığı 3,18 gr/cm3 Tip-1 çimento kullanılmıştır.

5.1.3. Süper akışkanlaştırıcı

Deneylerde süper akışkanlaştırıcı ve yüksek oran su azaltıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Yoğunluğu 1,082-1,142 g/cm³'dir.

5.1.4. Rötre Azaltıcı Katkı Maddesi (SRA)

İki farklı marka rötre azaltıcı katkı maddesi kullanılmıştır ve bu katkı maddeleri SRA-1 ve SRA-2 olarak isimlendirilmiştir.

5.2. Beton Fazında Yapılan Deneysel Çalışmalar

5.2.1. Beton Karışım Kompozisyonu

Su/çimento oranları 0,33 ve 0,53 olan iki tip beton ve her tip beton için iki farklı marka SRA ve kontrol amaçlı katkısız betonlar üretilmiştir. Her bir parti betonda 4 adet 10x10x50 cm prizma rötre deneyleri için, 5 adet 10x20 cm silindir elastisite modülü ve basınç mukavemeti deneyleri için üretilmiştir. Rötre ölçümü için üretilen numuneler beton dökümünden sonra 20℃ sabit sıcaklık ve %50 rutubette muhafaza edilmiştir. Basınç mukavemeti ve elastisite modülü için üretilen beton numuneler suda 28 gün bekletilmiştir.

Tablo 5.3: s/ç:0,33 Beton karışımına giren malzemeler ve özellikleri

BETON (1 m³)	**su/çimento = 0,33**		
Kullanılan Malzeme (kg)	**Katkısız**	**SRA-1**	**SRA-2**
Çimento	400	400	400
Su	132	132	132
Doğal Kum	437	432	432
Kırma Kum	506	500	500
Kırmataş-1	410	405	405
Kırmataş-2	586	579	579
Süper Akışkanlaştırıcı	5,2	5,2	5,2
SRA	0,0	8,0	8,0
Su/Çimento	0,33	0,33	0,33
(Su+SRA)/Çimento	0,33	0,35	0,35
SRA/Çimento	0	2%	2%
Çökme (cm	17	22	21
Gerçek Birim Ağırlık (kg/m3)	2540	2500	2500

Tablo 5.4: s/ç:0,53 Beton karışımına giren malzemeler ve özellikleri

BETON (1 m³)	**su/çimento = 0,53**		
Kullanılan Malzeme (kg)	**Katkısız**	**SRA-1**	**SRA-2**
Çimento	400	400	400
Su	212	212	212
Doğal Kum	391	387	387
Kırma Kum	453	447	447
Kırmataş-1	367	362	362
Kırmataş-2	524	518	518
Süper Akışkanlaştırıcı	0	0	0
SRA	0	8	8
Su/Çimento	0,53	0,53	0,53
(Su+SRA)/Çimento	0,53	0,55	0,55
SRA/Çimento	0	2%	2%
Çökme (cm)	9	13	13
Gerçek Birim Ağırlık (kg/m3)	2380	2390	2370

Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi, s/ç=0,33 betonda çimento ağırlığının %1,3 ü kadar kullanılmış ancak yüksek su/çimento oranı nedeniyle s/ç=0,53 betonda kullanılmamıştır. Karışımdaki su/çimento oranı sabit tutularak SRA'nın su miktarına ilavesiyle çökmeye etkisi incelenmiştir. Buna göre; SRA'nın, su/çimento:0,33 beton ile su/çimento:0,53 beton karışımlarındaki çökme değerlerine etkisine bakıldığında betonun işlenebilirliğine süper akışkanlaştırıcı gibi değil, su gibi katkıda bulunduğu gözlenmiştir.

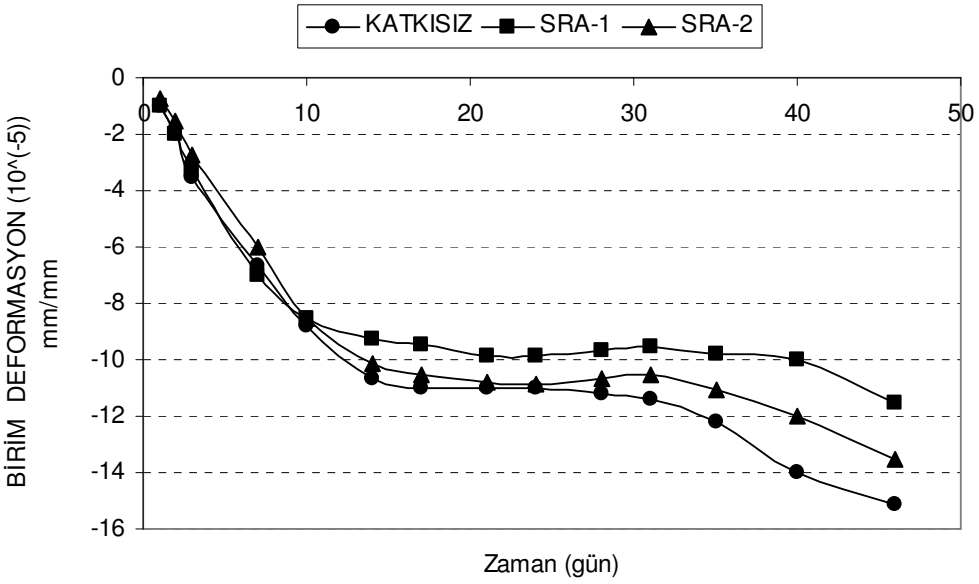
5.2.2. Beton Numunelerin Rötre Ölçümleri

Rötre ölçümleri 10 mikron (10^{-2} mm) hassasiyetli ölçme aparatlarıyla yapılmıştır. Numunelere kür uygulanmamış, doğrudan 20 ℃ sabit sıcaklık ve %50 neme sahip bir odada bekletilmiştir.

5.2.2.1. Su/Çimento= 0,33 Beton Numunelerin Rötre Ölçümleri

Tablo 5.5: s/ç:0,33 beton numunelerinin birim deformasyonu (mm/mm) $*10^{-5}$

OKUMA (gün)	KATKISIZ	SRA-1	SRA-2
1	-1.0000	-1.0000	-0.7500
2	-2.0000	-2.0000	-1.5000
3	-3.5000	-3.2500	-2.7500
7	-6.6667	-7.0000	-6.0000
10	-8.8333	-8.5000	-8.5000
14	-10.7000	-9.3000	-10.1000
17	-11.0000	-9.5000	-10.5000
21	-11.0000	-9.8333	-10.8194
24	-11.0000	-9.8750	-10.8750
28	-11.1875	-9.6875	-10.6875
31	-11.3750	-9.5000	-10.5000
35	-12.2143	-9.7857	-11.0714
40	-14.0000	-10.0000	-12.0000
46	-15.1250	-11.5000	-13.5000



Şekil 5.2: s/ç = 0,33 betonunda Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş beton numunelerinin birim deformasyonu

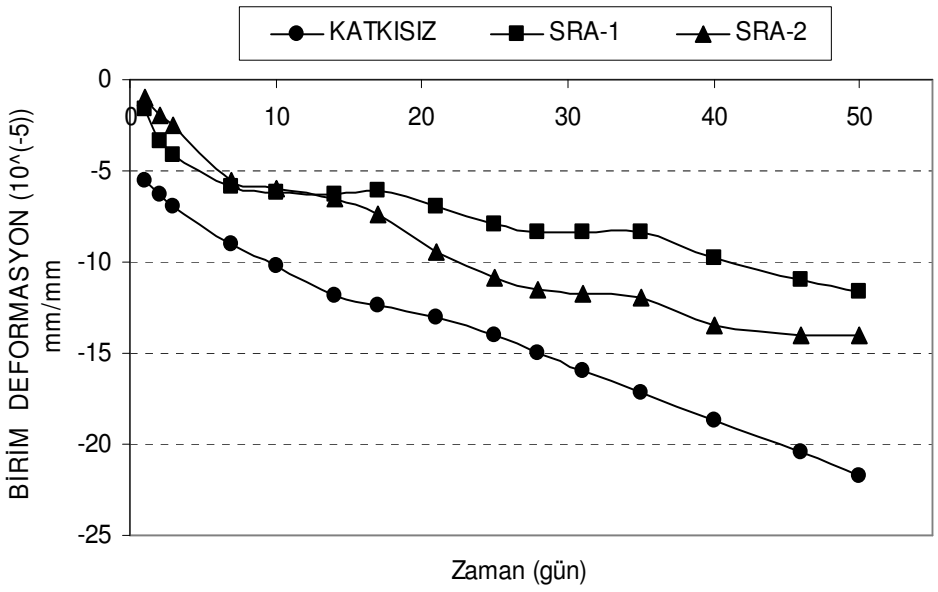
Tablo 5.3'de görüldüğü gibi düşük su/çimento oranlı betonlarda da rötre azaltıcı katkı maddeleri az da olsa birim rötre deformasyonunu azaltmıştır. Katkısız numuneye göre SRA1 ve SRA2 sırasıyla %24 ve %11 oranlarında betonda deformasyonu azaltmışlardır.

Düşük su/çimento oranlı ve kür uygulanmayan betonlarda otojen rötre daha belirgindir. Şekil 5.1'e bakıldığında ilk iki haftalık bölümde eğrilerin dik oluşu ve neredeyse aynı deformasyonu yapmaları dikkat çeker. Bu bölümde otojen rötrenin etkisi görülmektedir. Çünkü hidratasyon için gerekli su miktarı çimentonun tipi ve inceliği ile ilgilidir, rötre azaltıcı katkı maddeleri çimento hidratasyonu için gerekli su miktarını azaltmazlar. Bu yüzden hidratasyonun etkili olduğu bu ilk on günlük bölümde üç tip numune de yaklaşık aynı deformasyonu yapmışlardır. İlk iki haftadan sonra, yani hidratasyonun iyice yavaşlamasına müteakip kuruma rötresi belirginleşmiştir. Bu aşamada SRA-1 katkısının betonun kuruma rötresini daha fazla azalttığı gözlenmiştir.

5.2.2.2. Su/Çimento= 0,53 Beton Numunelerinin Rötre Ölçümleri

Tablo 5.6: s/ç:0,53 beton numunelerinin birim deformasyonu (mm/mm) $*10^{-5}$

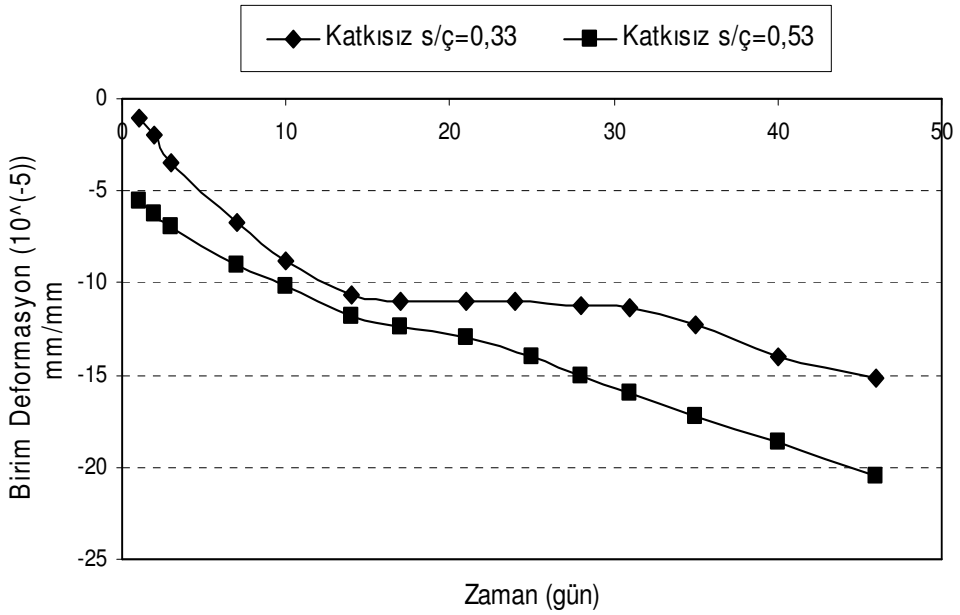
OKUMA (gün)	KATKISIZ	SRA-1	SRA-2
1	-5,5000	-1,6667	-1,0000
2	-6,2500	-3,3333	-2,0000
3	-7,0000	-4,1667	-2,5000
7	-9,0000	-5,8333	-5,5000
10	-10,1667	-6,2222	-6,0000
14	-11,8333	-6,3333	-6,5000
17	-12,4000	-6,1333	-7,4000
21	-13,0000	-7,0000	-9,5000
25	-14,0000	-7,8889	-10,8333
28	-15,0000	-8,3333	-11,5625
31	-15,9375	-8,3333	-11,7500
35	-17,1875	-8,3333	-12,0000
40	-18,6429	-9,7619	-13,4286
46	-20,4750	-11,0000	-14,0000
50	-21,7750	-11,6667	-14,0000



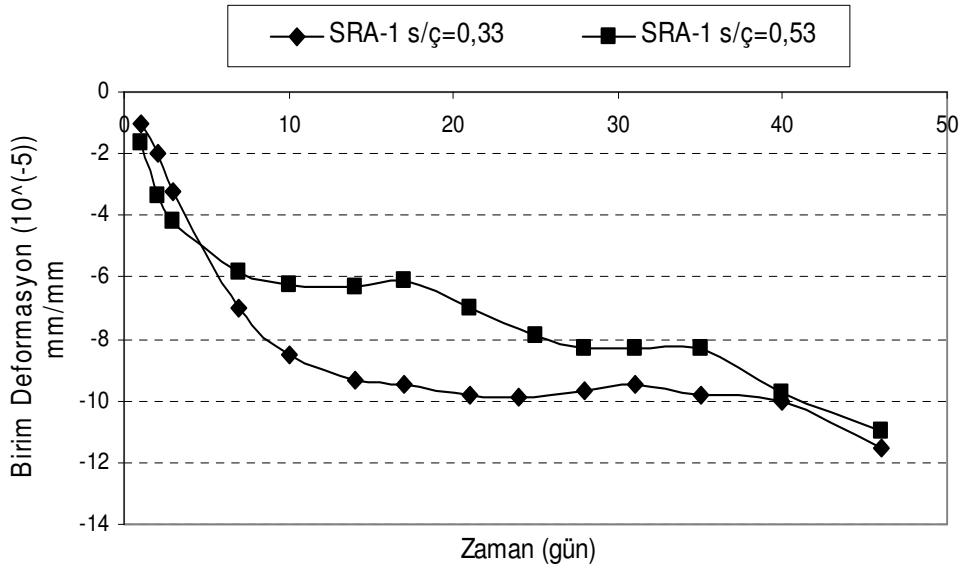
Şekil 5.3: s/ç = 0,53 betonunda Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş beton numunelerinin birim deformasyonu

Su/çimento oranı yüksek betonlarda rötre azaltıcı katkı maddelerinin etkisi Tablo 5.4 ve Şekil 5.2'de görülmektedir. SRA1 kullanılmış beton numuneler katkısız numuneye göre ortalama %46 oranında rötreyi azaltırken SRA2, %36 oranında rötreyi azaltmıştır.

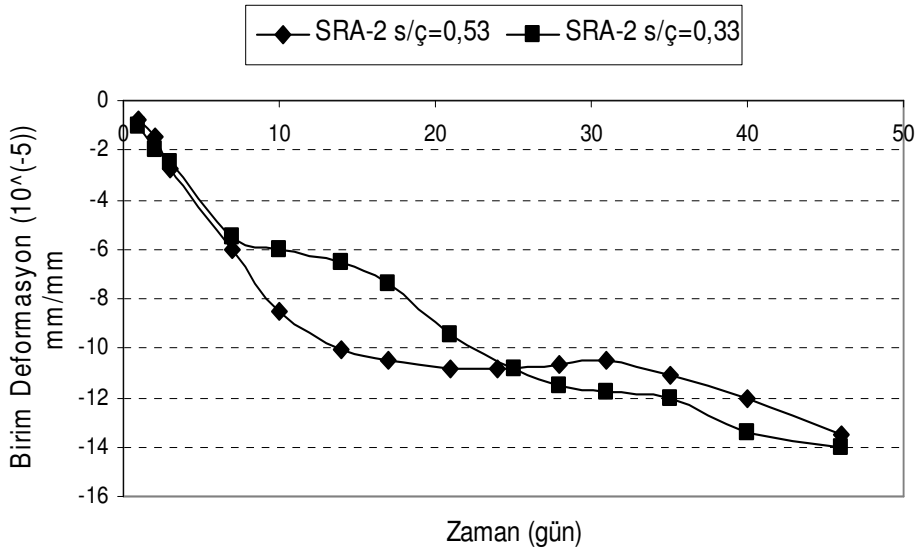
5.2.3 Su/Çimento= 0,33 ve 0,53 Beton Numunelerin Birim Deformasyon-Zaman Grafikleri



Şekil 5.4: s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 Katkısız Beton Numunelerin Birim Deformasyon-Zaman Grafiği



Şekil 5.5: s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 SRA-1 Katkılı Beton Numunelerin Birim Deformasyon-Zaman Grafiği.



Şekil 5.6: s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 SRA-2 Katkılı Beton Numunelerin Birim Deformasyon-Zaman Grafiği.

Katkısız beton numunelerde su/çimento oranının 0,33'den 0,53'e değişimiyle %35 oranında rötre artmıştır.

SRA-1 ve SRA-2 katkılı beton numunelerde su/çimento oranı artışıyla rötre miktarlarında kayda değer bir değişim görülmemiştir.

5.2.4. Elastisite Modülü ve Basınç Dayanımı Ölçümleri

5.2.4.1. Su/Çimento= 0,33 Beton Numunelerinin Mekanik Özellikleri

Tablo 5.7: s/ç=0,33 Beton Numunelerinin 28 Günlük Basınç Dayanımı

Numune Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)
Katkısız	90
SRA-1 Katkılı	68
SRA-2 Katkılı	77

28 gün suda bekletilen s/ç = 0,33 numuneler kırılmış ve Tablo 5.5' deki değerler elde edilmiştir. Buna göre SRA-2 katkılı numunelerde %18 oranında mukavemet kaybı gözlenirken SRA-1 katkılı numunelerde bu değer %33 olmuştur. Ancak agrega granülometrisi seçilirken BS32 sınıfı beton hedef alındığı için SRA1 katkılı numunelerin 28 günlük mukavemet sonuçlarının hedef beton değerlerine göre normal olduğu söylenebilir.

5.2.4.2. Su/Çimento= 0,53 Beton Numunelerinin Mekanik Özellikleri

Tablo 5.8: s/ç=0,53 Beton Numunelerinin 7 Günlük Mekanik Özellikleri

Numune Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Katkısız	41	37,6
SRA-1 Katkılı	26	35,2
SRA-2 Katkılı	38	32,2

İlk 7 gün sonunda sudan çıkarılan numuneler kırılarak Tablo 5.6'daki elastisite modülü ve basınç mukavemet değerleri elde edilmiştir. SRA2 katkı maddeli numunelerde %8 oranında mukavemet kaybı oluşmuşken, SRA1 katkı maddeli beton numunelerde %36 oranında bir mukavemet kaybı gerçekleşmiştir.

Üç tip beton numunede de elastisite modülleri birbirlerine yakın değerlerdedir.

Tablo 5.9: s/ç=0,53 Beton Numunelerinin 28 Günlük Mekanik Özellikleri

Numune Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Katkısız	51	37
SRA-1 Katkılı	44	32,9
SRA-2 Katkılı	47	36

28 gün suda bekleyen numunelerin basınç mukavemeti yine SRA kullanılmış betonlarda daha düşük çıkmıştır. SRA1 katkılı numunelerde %14 , SRA2 katkılı numunelerde %8 oranında mukavemet kaybı gerçekleşmiştir. Elastisite modülleri yine üç tip numune için de birbirlerine yakın değerdedir.

5.3. Harç Fazında Rötre Ölçümleri

5.3.1. Harç Karışım Kompozisyonu

Beton karışımında kullanılan malzemelerden kırmataş-1 ve kırmataş-2 eksiltilerek bunların oranları diğer malzemelere eşit bir şekilde dağıtılmıştır. Rötre ve ağırlık kaybı deneyleri için 4x4x16cm prizmalardan üçer adet üretilmiştir.

Rötre ölçümü için üretilen harç numuneler de beton numuneler gibi %50 nem ve 20°C sabit sıcaklıkta bekletilmiştir.

Tablo 5.10: s/ç:0,33 Harç karışımına giren malzemeler ve özellikleri

HARÇ (1 m³)	**su/çimento = 0,33**		
Kullanılan Malzeme (kg)	**Katkısız**	**SRA-1**	**SRA-2**
Çimento	640	635	635
Su	210	210	210
Doğal Kum	700	685	685
Kırma Kum	807	793	793
Süper Akışkanlaştırıcı	8,3	8,3	8,3
SRA	0,0	12,7	12,7
Su/Çimento	0,33	0,33	0,33
(Su+SRA)/Çimento	0,33	0,35	0,35
SRA/Çimento	0	2%	2%
Yayılma (cm) beton dökümünden hemen sonra	80cm/20sn	80cm/15sn	80cm/15sn
Gerçek Birim Ağırlık (kg/m3)	2350	2340	2350

Düşük su/çimento oranı nedeniyle çimento ağırlığının %1,3 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Tablo 5.11: s/ç:0,53 Harç karışımına giren malzemeler ve özellikleri

HARÇ (1 m³)	**su/çimento = 0,53**		
Kullanılan Malzeme (kg)	**Katkısız**	**SRA-1**	**SRA-2**
Çimento	600	597	597
Su	318	316	316
Doğal Kum	588	577	577
Kırma Kum	680	667	667
Süper Akışkanlaştırıcı	0	0	0
SRA	0	12	12
Su/Çimento	0,53	0,53	0,53
(Su+SRA)/Çimento	0,53	0,55	0,55
SRA/Çimento	0	2%	2%
Çökme (cm) beton dökümünden hemen sonra	21	23	23
Yayılma (cm)	40cm/3sn	45cm/3sn	45cm/3sn
Gerçek Birim Ağırlık (kg/m3)	2230	2220	2230

Su/çimento oranı yüksek olduğu için süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmamıştır. Ancak su/çimento oranı 0,33 olan ve süper akışkanlaştırıcı kullanılmış harç karışımına göre daha az yayılma yapmıştır.

5.3.2 Harç Numunelerin Rötre Ölçümleri

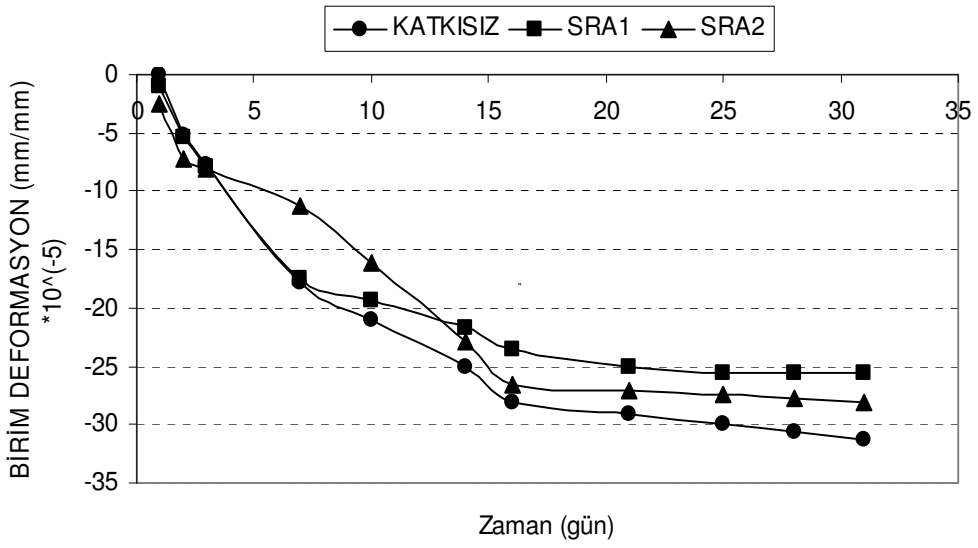
Rötre ölçümleri 10 mikron (100 mm) hassasiyetli ölçme aparatlarıyla yapılmıştır. Numunelere kür uygulanmamış, doğrudan 20 ℃ sabit sıcaklık ve %50 neme sahip bir odada bekletilmiştir.

Deneylerde Eclipse ve Tetraguard AS20 rötre azaltıcı katkı maddeleri yine rasgele SRA1 ve SRA2 olarak isimlendirilmiştir.

5.3.2.1. Su/Çimento= 0,33 Harç Numunelerin Rötre Ölçümleri

Tablo 5.12: s/ç:0,33 harç numunelerinin birim deformasyonu (mm/mm) $*10^{-5}$

OKUMA (gün)	KATKISIZ	SRA-1	SRA-2
1	0.0000	-1.0417	-2.5000
2	-5.2083	-5.4167	-7.1875
3	-7.7500	-7.8333	-8.0000
7	-17.9167	-17.5000	-11.2500
10	-20.9524	-19.2857	-16.2054
14	-25.0000	-21.6667	-22.8125
16	-28.1250	-23.5417	-26.5625
21	-29.1667	-25.0298	-27.0089
25	-30.0000	-25.6250	-27.4219
28	-30.6250	-25.6250	-27.7734
31	-31.2500	-25.6250	-28.1250



Şekil 5.7: s/ç = 0,33 harç fazında Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş numunelerinin birim boy değişimi

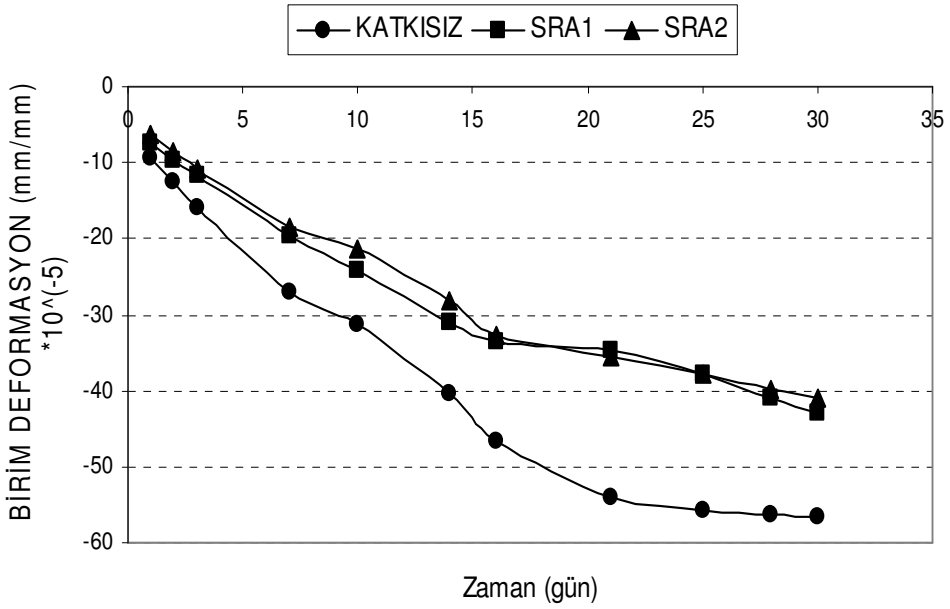
Şekil 5.6'da düşük su/çimentolu harç fazında kullanılan SRA katkı maddelerinin katkısız harç numunelerine göre daha az deformasyon yaptığı görülmektedir. SRA1 yaklaşık %18 oranında, SRA2 ise %10 oranında rötreyi azaltmıştır.

SRA kullanılmış numuneler ilk yedi gün boyunca katkısız beton ile neredeyse aynı deformasyonu yaparken bir haftadan sonra SRA kullanılmış numunelerde kuruma rötresinin azaldığı belirgin bir şekilde görülmektedir.

5.3.2.2. Su/Çimento= 0,53 Harç Numunelerin Rötre Ölçümleri

Tablo 5.13: s/ç:0,53 harç numunelerinin birim deformasyonu (mm/mm) $*10^{-5}$

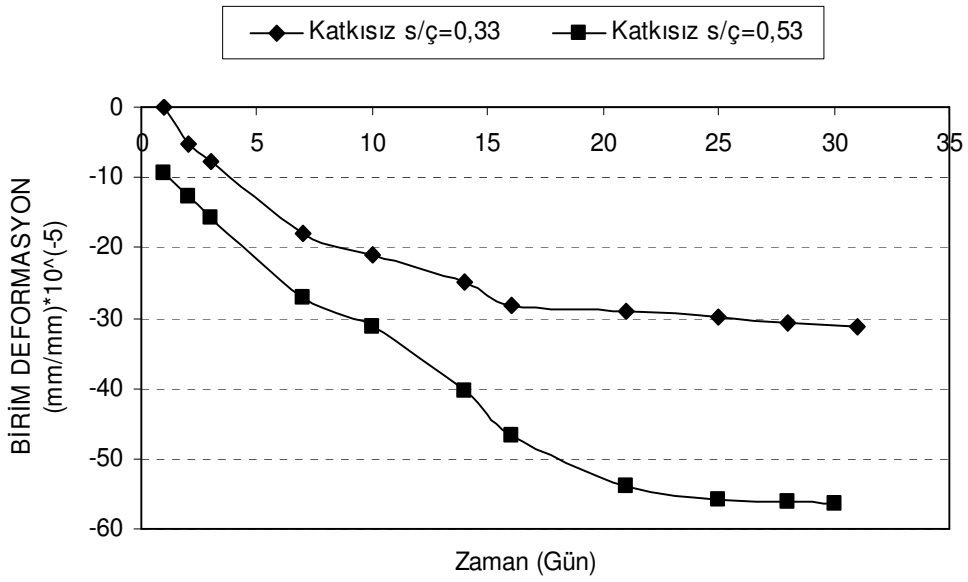
OKUMA (gün)	KATKISIZ	SRA-1	SRA-2
1	-9,37	-7,50	-6,25
2	-12,62	-9,63	-8,50
3	-15,87	-11,75	-10,75
7	-27,02	-19,64	-18,48
10	-31,22	-24,20	-21,43
14	-40,31	-31,09	-28,23
16	-46,67	-33,66	-32,65
21	-53,96	-34,78	-35,48
25	-55,81	-37,93	-37,92
28	-56,20	-40,86	-39,79
30	-56,46	-42,81	-41,04



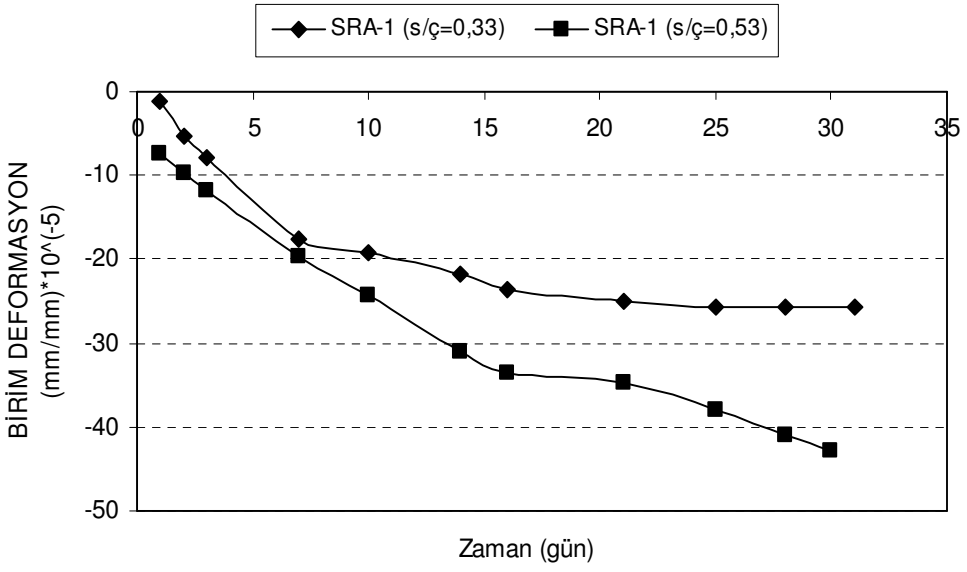
Şekil 5.8: s/ç = 0,53 harç fazında Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş numunelerin birim boy değişimi

Yüksek su/çimento oranlı harç fazında SRA1 kullanımı harç numunelerinin rötresini ilk bir ay sonunda %24, SRA2 ise %27 oranında azaltmıştır.

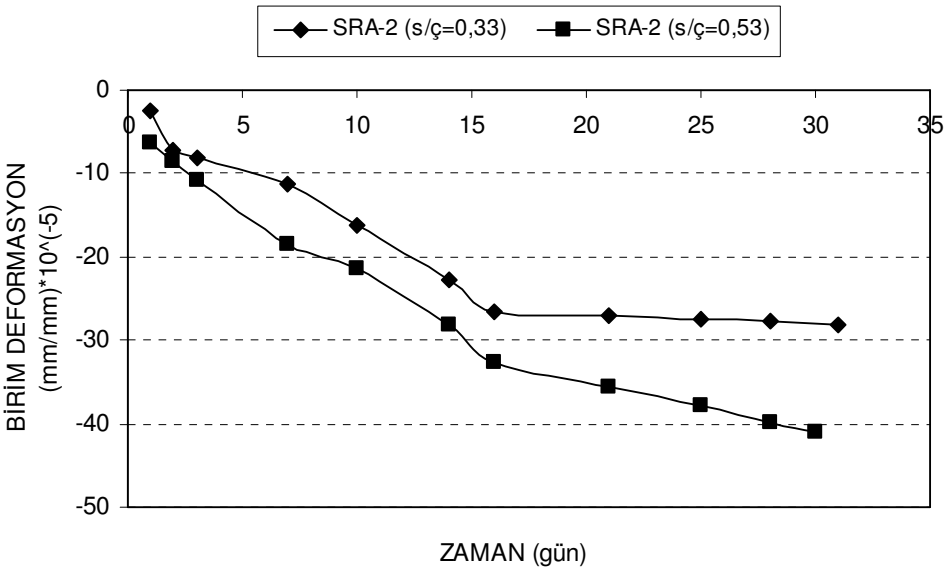
5.3.3 Su/Çimento= 0,33 ve 0,53 Harç Numunelerin Birim Deformasyon-Zaman Grafikleri



Şekil 5.9: s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 Katkısız Harç Numunelerin Birim Deformasyon-Zaman Grafiği



Şekil 5.10: s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 SRA-1 Katkılı Harç Numunelerin Birim Deformasyon-Zaman Grafiği



Şekil 5.10: s/ç = 0,33 ve s/ç = 0,53 SRA-2 Katkılı Harç Numunelerin Birim Deformasyon-Zaman Grafiği

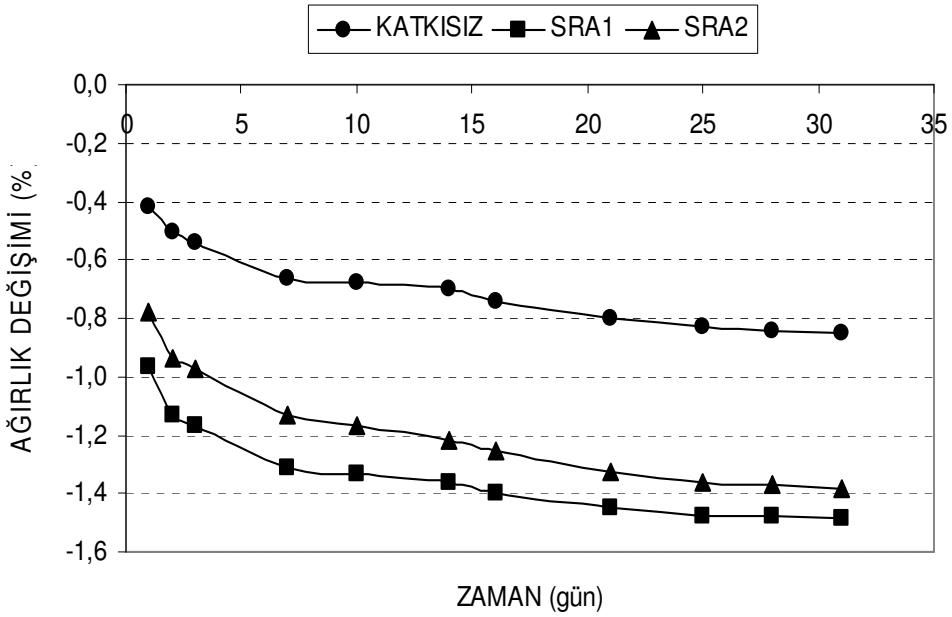
Harç numunelerde su/çimento oranının 0,33'den 0,53'e artışıyla Katkısız numunelerde %80, SRA-1 katkılı numunelerde %67 ve SRA-2 katkılı numunelerde %46 oranlarında birim deformasyon artışı gerçekleşmiştir.

5.3.4 Ağırlık Kaybı Ölçümleri

5.3.4.1 Su/Çimento= 0,33 Harç Numunelerinde Ağırlık Kaybı Ölçümleri (%)

Tablo 5.14: s/ç=0,33 harç numunelerinde ağırlık kaybı ölçümleri

OKUMA (gün)	KATKISIZ (%)	SRA-1 (%)	SRA-2 (%)
1	-0.4	-1.0	-0.8
2	-0.5	-1.1	-0.9
3	-0.5	-1.2	-1.0
7	-0.7	-1.3	-1.1
10	-0.7	-1.3	-1.2
14	-0.7	-1.4	-1.2
16	-0.7	-1.4	-1.3
21	-0.8	-1.5	-1.3
25	-0.8	-1.5	-1.4
28	-0.8	-1.5	-1.4
31	-0.9	-1.5	-1.4



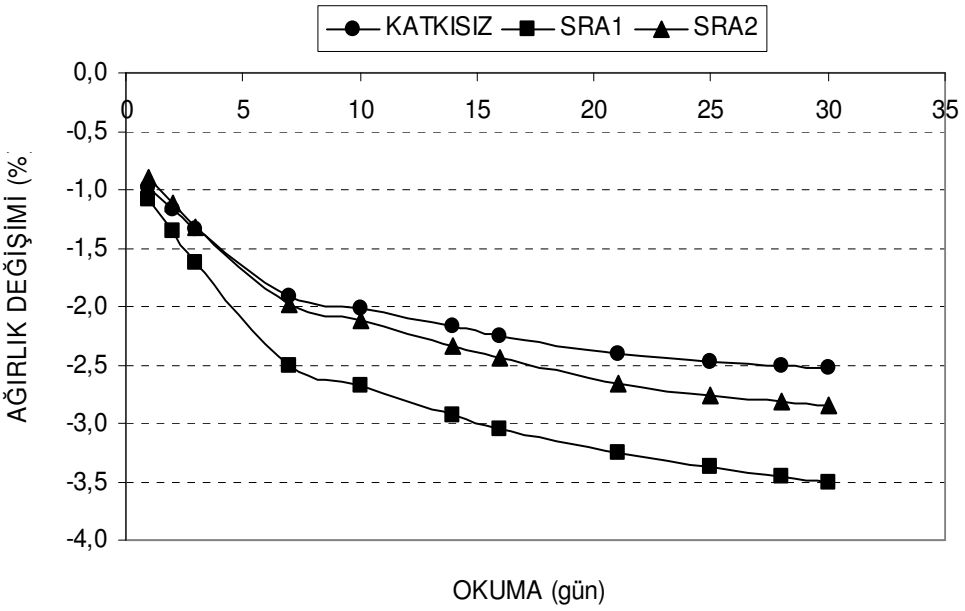
Şekil 5.11: s/ç = 0,33 harç fazında Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş numunelerin ağırlık kaybı-zaman grafiği.

s/ç=0,33 olan harç numunelerin zamanla ağırlık kayıpları ölçüldüğünde SRA kullanılmış harçlarda daha fazla su kaybı olduğu ancak daha az rötre yaptıkları gözlenmiştir.

5.3.3.2 Su/Çimento= 0,53 Harç Numunelerinde Ağırlık Kaybı Ölçümleri (%)

Tablo 5.15: s/ç=0,53 harç numunelerinde ağırlık kaybı ölçümleri

OKUMA (gün)	KATKISIZ (%)	SRA-1 (%)	SRA-2 (%)
1	-1,0	-1,1	-0,9
2	-1,2	-1,4	-1,1
3	-1,3	-1,6	-1,3
7	-1,9	-2,5	-2,0
10	-2,0	-2,7	-2,1
14	-2,2	-2,9	-2,3
16	-2,3	-3,0	-2,4
21	-2,4	-3,3	-2,7
25	-2,5	-3,4	-2,8
28	-2,5	-3,5	-2,8
30	-2,5	-3,5	-2,8



Şekil 5.12: s/ç = 0,53 harç fazında Katkısız, SRA-1 ve SRA-2 ile üretilmiş numunelerin ağırlık kaybı-zaman grafiği.

s/ç=0,53 harç fazında ağırlık kaybı, SRA1 ve SRA2 kullanılmış numunelerde katkısız numunelerden daha fazla olmuştur.

6. SONUÇLAR

1. Kür uygulanmamış, su/çimento oranı 0,53 olan beton numunelerde SRA-1 kullanımı rötreyi 50 gün sonunda Katkısız betonlara göre %46 oranında azaltmıştır. Su/çimento oran 0,33 olduğunda SRA-1 rötreyi yaklaşık %24 oranında azaltmaktadır. SRA-2 kullanıldığında ise bu oranlar sırasıyla %36 ve %11 olmuştur.
2. Su/Çimento oranının 0,33'den 0,53'e değişimiyle Katkısız betonlarda yaklaşık %35 oranında bir rötre artışı gözlenirken SRA kullanılmış numunelerde çimento oranının artışıyla kayda değer bir rötre artışı gözlenmemiştir.
3. Su/çimento oranı 0,33 olan beton numunelerin basınç dayanımında SRA-2 katkılı numunelerde %18 oranında mukavemet kaybı gözlenirken SRA-1 katkılı numunelerde %33 mukavemet kaybı gerçekleşmiştir.
4. Su/çimento oranı 0,53 olan beton numunelerin basınç dayanımında SRA-1 katkılı numuneler için %14 , SRA-2 katkılı numuneler için %8 oranında mukavemet kaybı gerçekleşmiştir.
5. Hem düşük su/çimento oranlı hem de yüksek su/çimento oranlı SRA katkılı beton numunelerin basınç dayanımlarının tasarlanan betonun sahip olması gereken minimum basınç dayanımından daha düşük olmadığı gözlenmiştir.
6. Beton numunelerin SRA katkılı veya katkısız oluşu, elastisite modülünü ciddi biçimde etkilememiştir.
7. Karakteristik basınç dayanımı testi için 28 gün suda bekleyen numuneler genleşir. SRA kullanılmış beton daha fazla genleşir. Bununla birlikte kapiler boşlukların %100 bağıl nemin etkisiyle suyla dolup şişmesi sonucu boşluk hacmi/katı hacmi artacaktır. Genleşen betonda atomlar arası mesafe de artacağı için daha fazla genleşen SRA numunelerde mukavemet kaybı da fazla olacaktır.

8. Kür yapılmadan karakteristik basınç dayanımı testi yapıldığında yine SRA kullanılmış numunelerde daha fazla mukavemet kaybı oluşur. Çünkü SRA, %100 bağıl nem durumunun aksine bu sefer betonda kapiler gerilmeleri azaltarak sıkışmasını engeller. Katkısız beton rötre yapıp sıkışırken SRA katkılı beton daha az rötre yapar. Böylece betonda atomlar arası mesafe SRA katkılı betonlarda daha fazla olacaktır. Bu da SRA katkılı betonlarda bir miktar mukavemet kaybına yol açar.

9. Kür uygulanmamış, su/çimento oranı 0,53 olan harç numunelerde SRA-1 kullanımı rötreyi 30 gün sonunda Katkısız betonlara göre %24 oranında azaltmıştır. Su/çimento oran 0,33 olduğunda SRA-1 rötreyi yaklaşık %18 oranında azaltmaktadır. SRA-2 kullanıldığında ise bu oranlar sırasıyla %27 ve %10 olmuştur.

10. Harç numunelerde su/çimento oranının 0,33'den 0,53'e artışıyla Katkısız numunelerde %80, SRA-1 katkılı numunelerde %67 ve SRA-2 katkılı numunelerde %46 oranlarında birim deformasyon artışı gerçekleşmiştir.

11. Harç numunelerin birim deformasyonunu beton numunelerin birim deformasyonuna kıyaslarsak, 30 gün sonunda; düşük su/çimento oranlı harç numuneler, beton numunelere göre 3 kat fazla birim deformasyon yapmıştır. Yüksek su/çimento oranında ise 4 kat fazla birim deformasyonu gözlenmiştir.

12. Ağırlık kaybı deneylerinde hem s/ç=0,33, hem de s/ç=0,53 oranlı harç fazında SRA katkılı numunelerin katkısız numunelere göre daha fazla ağırlık kaybettikleri gözlenmiştir. s/ç=0,33 oranlı numunelerde %75, s/ç=0,53 oranlı numunelerde %20 daha fazla su kaybı olmuştur. Bölüm 4.4'de "beton veya harç numunelerin iç rutubeti , bekletildikleri ortamın rutubetine yakınsa SRA eklentisi buharlaşmayı arttırır. Tam tersi durumda yani numunelerin iç rutubetinin ortamın rutubetine oranı çok yüksekse SRA eklentisi buharlaşmayı azaltır" sonucu çıkarılmıştı. Su/çimento oranı azaldıkça numune içi rutubet, ortamın rutubetiyle daha çabuk dengeye ulaşır. Buna göre %50 sabit rutubette bekletilen numunelerden düşük su/çimento oranlı ve SRA katkılı numunelerin Bölüm 4.4 teki sonucu destekler nitelikte daha fazla su kaybettikleri görülmüştür.

KAYNAKLAR

Adamson, A. W., 1990. "Physical Chemistry of Surfaces", 5th Edition, John Wiley and Sons, Inc., pp. 71, 777

Ai H., and Young, J.F., 1997. "Mechanisms of Shrinkage Reduction Using a Chemical Admixture," *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, ed. Justnes, H., Gothenburg, Sweden, Vol. 3

Bissonnette, Benoît, 1996. "Le fluage en traction: un aspect important de la problématique des réparations en béton", *Thèse de doctorat*, Université Laval, 279 pages.

Bissonnette, Benoît, Pascale PIERRE and Michel PIGEON, 1999. "Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials", *Cement and Concrete Research* , Vol. 29, no.10, pp. 1655-1662.

Bissonnette, Benoît and Michel PIGEON, 1995. "Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes", *Cement and Concrete Research* , Vol. 25, no. 5 , pp. 1075-1085.

Bloom, Ronit and Bentur, Arnon, 1995. "Free and Restrained Shrinkage of Normal and High Strength Concretes", *ACI Materials Journal*, v 30, n 2, pp 211-217.

Brad Pease, Hardik Shah ve Jason Weiss, 2005. "Shrinkage Behavior and Residual Stress Development in Mortar Containing Shrinkage Reducing Admixtures (SRA's)"

Bruno D'Souza, 2005 "Shrinkage Reducing Admixtures", Admixture Systems Degussa Construction Chemicals Australia Pty Ltd.

David W. Mokarem., 2002. "Development of Concrete Shrinkage Performance Specifiations."

D.P.Bentz, 2006. "Potential Applications of Shrinkage-Reducing Admixtures beyond Drying Shrinkage Reduction"

D.P.Bentz and O.M.Jensen, 2004. "Mitigation Strategies for Autogenous Shrinkage Cracking"

D.P.Bentz, P.Lura, J.W.Roberts, 2005. "Mixture Proportioning for Internal Curing, *Concrete International*" ; Vol.27, No.2, pp.35-40

Edificio and Jordi Girona, 2003. "Evaluation of the long term behaviour of concretes incorporating a shrinkage reducing admixture"

Gebler, Steven H., and Klieger, Paul, 1950. "Effect of Fly Ash on Physical Properties of Concrete", *ACI Materials Journal.*

Han, N.; Walraven, J.C., 1994. "Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete at Early and Normal Ages."

Haque, M. N., 1996. "Strength Development and Drying Shrinkage of High Strength Concretes, *Cement and Concrete Composites*", v 18, n 5, pp 333-342.

L'Hermite, R.G., 1960. "Volume Changes of Concrete", *Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington*, D.C., pp. 659-694.

Lura, P., Mazotta, B., Rajabipour, F., Weiss, J., 2005. "Evaporation, Settlement, Temperature Evolution, and Development of Plastic Shrinkage Cracks in Mortars with Shrinkage-Reducing Admixtures".

Lynam, G.C., 1934. "Growth and Movement of Portland Cement Concrete", Oxford University Pres, London, U.K., p.p.1-139.

Meyer, L. M., and W. F. Perenchio., 1979. "Theory of concrete slump loss as related to use of chemical admixtures. Concrete International. *Design and Construction 1*" (1):36-43.

Mehta, P. K., 1986. "Concrete: Structures, Properties and Materials", New York, Chapter 6 and Chapter 8.

M.D. D'Ambrosia, S.A. Altoubat, C. Park, and D. A. Lange, 2001. "Early Age Tensile Creep and Shrinkage of Concrete with Shrinkage Reducing Admixtures," pp. 685-90 in Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials, ed. F. Ulm, Z. Bazant, F.H. Wittman, (Proc. of CONCREEP '01, Boston, Aug 13-15, 2001)

Neville, Adam M., 2000. Propriétés des bétons , Paris, Éditions Eyrolles, pp. 804

Powers, T.C., 1968. 'The Properties of Fresh Concrete'.

Powers, T.C., 1946. "Studies of The Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, Chicago".

Powers, T. C., L. E. Copeland, J. C. Hayes, and H. M. Mann., 1954. Permeability of portland cement paste. *ACl Journal Proceedings* 51 (3):285-98.

Pickett, G., 1956. "Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and Hypothesis Concerning Shrinkage," *Journal of ACI*, Vol. 52, pp. 581-590.

Saito, Mitsuru, Kawamura, Mitsunori, and Arakawa, Seiichi, 1991. "Role of Aggregate in the Shrinkage of Ordinary Portland and Expansive Cement Concrete, Cement and Concrete Composites", v 13, n 2, pp 115-121.

Tazawa, E., Miyazawa, S., 1997. "Influence of Constituents and Composition on Autogenous Shrinkage of Cementitious Materials", *Magazine of Concrete Research*, v 49, n 178, pp 15-22.

Uyan, M., 1977. "Beton ve Harçlarda Kılcallık Olayı", *Doktora tezi* , İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi.

Verbeck, G. J., 1968. "Field and laboratory studies of the sulfate resistance of concrete. In Performance of concrete resistance of concrete to sulfate and other environmental conditions: *Thorvaldson symposium*", 113-24. Toronto

ÖZGEÇMİŞ

Turgay KADIOĞLU, 1978 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladıktan sonra Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 1999 yılında mezun oldu. Hizmet binaları, çok katlı evler ve toplu konut inşaatı işlerinde çalışmıştır. Evli ve bir çocuk babası olan Turgay KADIOĞLU Lisansüstü eğitimine İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Anabilim dalı'nda devam etmektedir.