



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KURUMA BÜZÜLME ENGELLEYİCİ KATKI VE LİF KULLANIMININ  
ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN TAZE HAL, MEKANİK VE BAZI DURABİLİTE  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Metin İLHAN**

Yrd. Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2018

## TEZ ONAYI

Metin İLHAN tarafından hazırlanan "Kuruma Büzülme Engelleyici Katkı ve Lif Kullanımının Çimentolu Sistemlerin Taze Hal, Mekanik ve Bazı Durabilite Özelliklerine Etkisi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU

**Başkan :** Yrd. Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU  
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği, Yapı Anabilim Dalı

İmza

**Üye :** Prof. Dr. Şemsi YAZICI  
Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı

İmza

**Üye :** Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN  
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği, Yapı Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım  
Prof. Dr. Ali BAYRAM  
Enstitü Müdürü  
30.11.2018

İmza

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**11/01/2018**

**İmza**

**Metin İLHAN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### **KURUMA BÜZÜLME ENGELLEYİCİ KATKI VE LİF KULLANIMININ ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN TAZE HAL, MEKANİK VE BAZI DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Metin İLHAN**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU

Bu çalışmada, rötre azaltıcı katkı (SRA) ve polipropilen lif (PF) kullanımının çimentolu sistemlerin bazı taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kullanılan su azaltıcı katkının SRA ile uyumu da araştırılmıştır. Bu amaçla, 4 aşamalı bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, kontrol karışımına ilaveten 4 farklı fabrika ürünü olan 9 adet sıvı ve toz halinde olan ticari SRA kullanılarak hamur ve harç karışımları hazırlanmıştır. SRA içeren tüm karışımlarda, çimento ağırlığının %2'si kadar SRA kullanılmıştır. Hamur karışımlarında su/çimento oranı 0.35 olarak sabit tutulmuştur. Tüm harç karışımlarında ise su/çimento oranı, kum/bağlayıcı oranı ve yayılma değeri sırasıyla, 0.485, 2.75 ve 230±20 mm olarak sabit tutulmuştur. Hazırlanan hamur karışımlarında Marsh hunisi akış süresi ve mini çökme deneyi gerçekleştirilmiştir. Harç karışımlarında ise 1, 3, 7, 28 günlük basınç dayanımı, 28 günlük su emme kapasitesi ve 28 günlük kuruma rötresi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına dayanarak taze ve sertleşmiş hal özellikleri açısından en başarılı sonucu gösteren SRA belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, en başarılı olarak seçilen SRA kullanılarak beton karışımları hazırlanmıştır. Tüm beton karışımlarında, su/çimento oranı, çimento dozajı ve çökme değeri sırasıyla, 0.4, 450 kg/m<sup>3</sup> ve 210±20 mm olarak sabit tutulmuştur. Hazırlanan beton karışımlarında çökme deneyi, 1, 3, 7, 28 günlük basınç dayanımı, 28 günlük su emme kapasitesi ve 28 günlük kuruma rötresi deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın üçüncü aşamasında, toplam hacmin %1'i PF kullanılarak, lif içermeyen kontrol karışımına ilaveten lifli beton karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan beton karışımlarının taze ve sertleşmiş hal özellikleri incelenmiştir. PF ve SRA kullanımının beton karışımlarında oluşturduğu etkiler kıyaslanmıştır. Dördüncü aşamada ise, kontrol karışımına ilaveten, çimento ağırlığının %2'si kadar SRA ve toplam hacmin %1'i oranında PF kullanılarak, SRA içeren lifli beton karışımları hazırlanmıştır. Söz konusu tüm taze ve sertleşmiş hal deneyleri tekrarlanmıştır. Bunlara ilaveten, seçilen bazı harç karışımlarında kuruma rötresi mikroskop analizleriyle incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, PF kullanımı, kuruma rötresi açısından, SRA kullanımına göre daha başarılı sonuç göstermiştir. SRA

ve PF'in beraber kullanılması kuruma rötresi açısından herhangi bir ekstra olumlu etki göstermemiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Rötre Azaltıcı Katkı, Lif, Çimentolu Sistemler, Taze Hal Özellikleri, Mekanik Özellikler, Geçirgenlik Özellikleri

**2018, x + 83 sayfa**



## **ABSTARCT**

MSc Thesis

### **EFFECT OF UTILIZATION OF DRIYING-SHRINKAGE REDUCING ADMIXTURE AND FIBER ON FRESH STATE, MECHANICAL AND SOME DURABILITY PROPERTIES OF CEMENTITIOUS SYSTEMS**

**Metin İLHAN**

Department of Civil Engineering  
Uludağ University

**Adviser:** Assist. Prof. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU

In this study, the effect of the utilization of shrinkage reducing admixture (SRA) and polypropylene fiber (PF) on some fresh and hardened state properties of cementitious systems were investigated. The compatibility between water reducing admixture and SRA was researched. For this purpose, 4-stage experimental study was carried out. In the first step, in addition to the control mixture, paste and mortar mixtures were prepared by using 9 liquids and powders commercial SRA provided from 4 different factories. SRA was used 2 wt.% of cement in all mixtures containing SRA. The water / cement ratio in the paste mixtures was kept constant as 0.35. In all mortar mixtures, water / cement ratio, sand / binder ratio and flow value were kept constant as 0.485, 2.75 and  $230 \pm 20$  mm respectively. Marsh funnel flow time and mini slump test were performed in all paste mixtures. 1, 3, 7, 28-day compressive strength, 28-day water absorption capacity and 28-day drying-shrinkage of mortar mixtures were measured. According to first step test results, the SRA showed the most successful result in terms of fresh and hardened state properties was determined. In the second step of the study, concrete mixtures were prepared by using the selected SRA in first step. In all concrete mixtures, the water / cement ratio, cement dosage and slump values were kept constant as 0.4, 450 kg / m<sup>3</sup> and  $210 \pm 20$  mm, respectively. In the prepared concrete mixtures, slump test, 1, 3, 7, 28-day compressive strength, 28-day water absorption capacity and 28-day drying shrinkage test were done. In the third step of the study, in addition to the fiber-free control mixture, PF was used 1% of the total volume in order to prepare fiber reinforcement concrete mixtures. The fresh and hardened state properties of the concrete mixtures were obtained. The effects of utilization of PF and SRA on concrete mixtures were compared. In the fourth step, in addition to the control mixture, fiber reinforcement concrete mixtures containing SRA were prepared by using 2 wt.% of the cement SRA and 1% PF of total volume. All fresh and hardened state tests were repeated. In addition, the drying shrinkage of some selected mortar mixtures were examined by microscopic analysis. Test results demonstrated that the utilization of the PF showed more successful results than SRA utilization in terms of drying shrinkage. The combined utilization of SRA and PF did not show any extra positive effect in terms of drying shrinkage.

**Keywords:** Drying-Shrinkage Reducing Admixture, Fiber, Cementitious Systems, Fresh Properties, Mechanical Properties, Permeability Properties

**2018, x + 84 pages**



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarının her aşamasında bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim, azmi ve enerjisiyle bizleri motive eden, bizzat kendi zamanından feragat edip emek harcayan tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Ali Mardani Aghabaglou'ya, İnşaat Mühendisliği bölüm başkanlığını yapan hocamız Prof. Dr. Adem Doğangün'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Yapı malzemesi laboratuvarındaki çalışmalarında her zaman desteklerini aldığım Arş. Gör. Süleyman Özen'e, değerli meslektaşlarım İnşaat Mühendisi Ali Nematzadeh'e ve İnşaat Mühendisi Ece Geven'e, İnşaat Mühendisi Beşir Kemal Işık'a, İnşaat Mühendisi Harun Reşit Ayvacı'ya ve İnşaat Mühendisi Mujeebul Rahman Latifi'ye teşekkür ederim.

SLBÇ(MH) 2017/3 numaralı proje kapsamında bu tez çalışmasına destek veren Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinasyon Birimi'ne şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarda kullanılan standart kum ve çimento temini için Bursa Beton A.Ş.'ne, su azaltıcı katkı ve büzülme engelleyici katkı temini için Polisan A.Ş.'ne ve büzülme engelleyici katkı temini için BASF'ye teşekkür ederim.

Son olarak bu süreçte desteklerini benden esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TESEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Rötire.....	3
2.2. Rötire Türleri.....	3
2.2.1. Plastik Rötire .....	4
2.2.2. Kuruma Rötiresi.....	5
2.2.3. Otojen Rötire.....	7
2.2.4. Karbonatlaşma Rötiresi.....	8
2.3. Rötireye Etki Eden Faktörler.....	10
2.3.1. Çimento Özelliklerinin Etkisi.....	10
2.3.2. Su/Çimento Oranının Etkisi.....	14
2.3.3. Agreganın Etkisi .....	17
2.3.4. Mineral Katkı Kullanımının Etkisi.....	19
2.3.5. Bazı Kimyasal Katkıların Kullanımının Etkisi.....	26
2.3.6. Betonun Boşluk Yapısının Etkisi.....	31
2.3.7. Ortam Sıcaklığının Etkisi.....	33
2.3.8. Bağıl Nem Etkisi.....	34
2.4. Rötire Azaltıcı Katkı (SRA).....	35
2.4.1. Kimyasal Yapısı.....	35
2.4.2. Çalışma Mekanizması.....	35
2.4.3. Buharlaşmaya Etkisi.....	36
2.4.4. Diğer Katkılarla Uyumluluk ve Karışımların Mekanik Özellikleri.....	36
3. KONU İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	38
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	46
4.1. Amaç ve Kapsam.....	46
4.2. Malzemeler.....	47
4.2.1. Çimento.....	47
4.2.2. Agregası.....	47

4.2.3. Süper Akışkanlaştırıcı.....	50
4.2.4. Rötne Azaltıcı Katkı (SRA).....	50
4.2.5. Polipropilen Lif.....	50
4.3. Karışımların Hazırlanması.....	51
4.3.1. Çimento Hamuru Karışımlarının Hazırlanması.....	51
4.3.2. Harç Karışımlarının Hazırlanması.....	51
4.3.3. Beton Karışımlarının Hazırlanması.....	52
4.4. Çalışmada Uygulanan Deneyler.....	54
4.4.1. Hamur Karışımı Deneyleri.....	54
4.4.1.1. Marsh Hunisi Akış Süresi ve Mini Çökme.....	54
4.5.2. Harç Karışımı Deneyleri.....	54
4.5.2.1. Yayılma.....	54
4.5.2.2. Basınç Dayanımı.....	54
4.5.2.3. Su Emme Oranı.....	54
4.5.2.4. Kuruma Rötresi.....	55
4.6.3. Beton Karışımı Deneyleri.....	56
4.6.3.1. Çökme.....	56
4.6.3.2. Basınç Dayanımı.....	56
4.6.3.3. Su Emme Oranı.....	56
4.6.3.4. Kuruma Rötresi.....	56
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	58
5.1. Hamur Deneylerine İlişkin Sonuçlar.....	58
5.1.1. Marsh Hunisi Akış Süresi ve Mini Çökme Deneyi.....	58
5.2. Harç Deneylerine İlişkin Sonuçlar.....	60
5.2.1. Yayılma.....	60
5.2.2. Basınç Dayanımı.....	60
5.2.3. Su Emme Oranı.....	61
5.2.4. Kuruma Rötresi.....	63
5.3. Beton Deneylerine İlişkin Sonuçlar.....	66
5.3.1. Çökme.....	66
5.3.2. Basınç Dayanımı.....	66
5.3.3. Su Emme Oranı.....	67
5.3.4. Kuruma Rötresi.....	69
6. SONUÇLAR.....	72
7. ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	79

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$Al_2O_3$	Alüminyum Oksit
$C_2S$	Dikalsiyum Silikat
$C_3S$	Trikalsiyum Silikat
$C_3A$	Trikalsiyum Alüminat
$C_4AF$	Tetrakalsiyum Alumino Ferrit
$CaO$	Kalsiyum Oksit
$SO_3$	Kükürt Trioksit
$SiO_2$	Silisyum Dioksit
$CO_2$	Karbon Dioksit
$CaCO_3$	Kalsiyum Karbonat

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
ASTM	American Society for Testing Materials
MPa	Metrik Sistemin Basınç Birimi
TS EN	Türk Standartları, EN: Avrupa Normu
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
SD	Silis Dumanı
ITZ	Agrega-hamur Arayüzeyi
SAP	Süper Emici Polimer
HAL	Hurma Ağacı Lifi
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
SEM	Scanning Electron Microscope
SRA	Shrinkage Reducing Admixture
PF	Polipropilen Lif

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Plastik Rötire Çatlakları.....	4
Şekil 2.2: Otopark zemin kaplamasında kuruma rötiresi çatlağı.....	6
Şekil 2.3: CO <sub>2</sub> 'li ve CO <sub>2</sub> 'siz ortamda beton numunesinin bağıl nemi.....	9
Şekil 2.4: Çimento tipinin kapiler basınç üzerine etkisi.....	14
Şekil 2.5: Çimento hamurunun boşluk sisteminde suyun şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.6: Betonun otojen rötiresinde s/ç oranının etkisi.....	17
Şekil 2.7: Agregat/çimento ve su/çimento oranlarının kuruma rötiresine etkisi.....	18
Şekil 2.8: Betonun otojen rötiresinde SD'nin etkisi.....	21
Şekil 2.9: Silis dumanı miktarı ve lif oranının plastik rötire çatlak alanına etkisi.....	22
Şekil 2.10: Uçucu külün otojen rötire üzerindeki etkisi.....	25
Şekil 2.11: Su azaltıcı katkının otojen rötire üzerindeki.....	29
Şekil 2.12: Farklı oranlarda su azaltıcı katkı otojen rötiresi.....	30
Şekil 2.13: Su/çimento oranının beton geçirimsizliğine etkisi.....	32
Şekil 2.14: Farklı sıcaklıklarda kür edilen otojen deformasyonu.....	34
Şekil 3.1: Rötire Azaltıcı Katkı ve NanoSiO <sub>2</sub> Sentezi.....	39
Şekil 3.2: Numunelerin 28 Günlük Basınç Dayanımı ve Rötire Değerleri.....	39
Şekil 3.3: Numunelerin çeşitli zamanlardaki basınç.....	40
Şekil 3.4: Kendiliğinden Yerleşen Beton Numunelerinin Rötire Değerleri.....	42
Şekil 3.5: Agregat-hamur Arayüzeyi (ITZ).....	43
Şekil 3.6: Beton numunelerinin kuruma rötiresi.....	44
Şekil 4.1: Agregat karışımının gradasyon eğrisi ve TS EN 206 standart limitleri.....	49
Şekil 4.2: Harç karışımlarının kuruma rötiresi ölçümü.....	55
Şekil 5.1: Hamur karışımlarının Marsh hunisi akış süreleri.....	59
Şekil 5.2: Hamur karışımlarının mini çökme değerleri.....	59
Şekil 5.3: Harç Karışımlarının Basınç Dayanımları.....	61
Şekil 5.4: Harç Karışımlarının Su Emme Oranı.....	62
Şekil 5.5: Harç Karışımlarının 28 Günlük Basınç Dayanımı ve Su Emme Oranı.....	62
Şekil 5.6: Harç Karışımlarının Kuruma Rötiresi Değerleri.....	63
Şekil 5.7: Harç Karışımlarının 28 Günlük Bağıl Kuruma Rötiresi Değerleri.....	64
Şekil 5.8: SRA içeren A karışımının mikroskopik görüntüsü.....	64
Şekil 5.9: SRA içermeyen kontrol karışımının mikroskopik görüntüsü.....	65
Şekil 5.10: Harç Karışımlarının 28 Günlük Kuruma Rötiresi Değerleri.....	65
Şekil 5.11. Beton karışımlarının basınç.....	67
Şekil 5.12. Beton karışımlarının 28-günlük su emme oranı.....	68
Şekil 5.13. Beton karışımlarının 28-günlük su emme oranı.....	68
Şekil 5.14. Beton karışımlarının 28-günlük kuruma büzülme değerleri.....	70
Şekil 5.15. Beton karışımlarının 28-günlük bağıl kuruma büzülme değerleri.....	70
Şekil 5.16. Beton karışımlarının 28-günlük kuruma büzülme değerleri.....	71

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1:</b> Çimento Anabilesenlerinin Bazı Karakteristik Özellikleri.....	11
<b>Çizelge 2.2:</b> Çimentoların karakteri ve kullanıldığı yerler.....	13
<b>Çizelge 2.3:</b> Kuruma rötresine bazı katkı maddelerinin etkileri.....	24
<b>Çizelge 3.1:</b> Üretilen beton karışımlarının bazı özellikleri.....	38
<b>Çizelge 4.1:</b> Çimentonun kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	47
<b>Çizelge 4.2:</b> Standart Kumun Tane Boyu Dağılımı.....	48
<b>Çizelge 4.3:</b> Beton karışımlarında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.....	48
<b>Çizelge 4.4:</b> Karışımlarda kullanılan agregaların elek analizi sonuçları.....	49
<b>Çizelge 4.5:</b> Süper akışkanlaştırıcı katkıya ait özellikler.....	50
<b>Çizelge 4.6:</b> Rötire azaltıcı katkı özellikleri.....	50
<b>Çizelge 4.7:</b> Harç Karışımlarının Üretimde Kullanılan Malzeme Oranı.....	52
<b>Çizelge 4.8:</b> 1 m <sup>3</sup> beton karışımı için teorik karışım oranları.....	53
<b>Çizelge 4.9:</b> Düzeltilmiş karışım oranları.....	53

## 1. GİRİŞ

Bilindiği gibi beton karışımlarının mukavemetini azaltan olumsuz etkenlerden biri rötredir. Betonun büzülmesi şeklinde tanımlanan rötre, betonda yüzeysel veya derin çatlaklar meydana getirir. Çatlaklar sonucu beton ve harç karışımlarının geçirgenlik özellikleri ve dayanımı olumsuz şekilde etkilenmektedir (Hearn 1999). Böylece betonarme yapılarda korozyon riski de artabilmektedir. Betonarme yapılarda beton fazı, yapının basınç dayanımını karşılama yanında, pasif tabaka oluşturduğundan (CH'ların varlığından bazik ortam oluşur) donatıyı korozyona karşı da korur. Ancak, rötre sonucu beton karışımının geçirgenliği arttığından hava, su ve kimyasal maddeler rahatlıkla betona girebileceğinden, donatı korozyon oluşumuna veya beton dayanıklılığının azalmasına neden olmaktadır. Bu yüzden rötre hem statik hem de estetik olarak kötü sonuçlara neden olabilir.

Betonun priz alma esnasında beton yüzeyindeki suyun buharlaşması sonucu büyük boşluklarda bulunan su yüzeye hareket ederek buharlaşır. Ortamın bağıl nemi çok düşük ise veya ortam sıcaklığı çok yüksek ise betonun büyük boşluklarındaki su buharlaştıktan sonra katmanlar arası küçük boşluklardaki sular kılcal yollarla büyük boşluklara hareket eder. Böylece, katmanlar arası basınç oluşturan su, kaybolduğundan katmanlar birbirine yaklaşır. Dolayısıyla, bir büzülme oluşumu söz konusu olur. Büzülmeden kaynaklı bir iç gerilme doğar. Oluşan bu gerilme, çimentolu sistemlerin çekme dayanımını aşar ise çatlak oluşur. Betonun rötresini çimento pastasının boşluk oranı, yaşı, hidrasyon derecesi, su/çimento oranı, kür sıcaklığı, çimento içeriği, su içeriği, katkıların özellikleri (kimyasal ya da mineral katkıları), betonun agrega özelliği, agrega içeriği, hacim/yüzey oranı, kalınlığı gibi özellikleri etkilemektedir (Topçu 2007 ve Mehta 1986).

Taze betonda işlenebilirlik, sertleşmiş betonda ise dayanım ve dayanıklılık özellikleri betonda aranan en önemli özelliklerdir. Betonun rötresi ve dolayısıyla oluşan çatlaklar dayanım ve dayanıklılığı olumsuz etkiler ve servis ömrü yüksek kaliteli bir beton üretilmesini engeller. Bu çatlakları engellemek için su/çimento oranını azaltmak, rötre azaltıcı katkı (SRA) ve mineral katkı kullanmak ya da lif kullanmak gibi yöntemler uygulanmaktadır. Su/çimento oranını azaltmak, lif ve mineral katkı kullanmak, taze betonda en çok aranan özelliklerden biri olan işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir. Su azaltıcı katkı kullanmak her ne kadar işlenebilirliği arttırsa da karışımların rötresini

azaltmak için son yıllarda tercih edilen diğer bir yöntem ise SRA kullanımınıdır. Bilindiği gibi, SRA maddeleri düşük viskoziteye sahip maddelerdir ve bu sebeple suya %1 oranında eklenmesi durumunda dahi yüzey gerilmelerinde %30 oranında azalma sağlamaktadır. SRA kapiler boşluklarda var olan sudaki gerilmelerin oluşumunu azaltmakta ve böylece suyun dışarı çıkışı engellenmektedir. Bu sayede sünmeye neden olacak gerilmeler azaldığı için sünmeyi de azaltmaktadır ve çatlak oluşumu engellenmektedir. Lif kullanımının olumlu yanı ise betonun bazı mekanik özelliklerini olumlu etkilemesidir (Folliard ve Berke 1997).

Ayrıntılı bir şekilde yapılan literatür araştırmasına rağmen polipropilen lif (PF) ve SRA birlikte kullanıldığı çalışmalar kısıtlı sayıdadır. Polipropilen lif ve SRA'nın birlikte kullanıldığı durumda rötrenin daha az olması beklenmektedir.

## **2. GENEL BİLGİLER**

### **2.1. Rötire**

Rötire, çimentolu sistemlerin bünyesinde bulunan suyun çeşitli nedenlerle azalması sonucu ortaya çıkan hacimsel küçülmeye denir (Erdoğan 2003). Betonun rötiresi ise, zamana bağlı hacimsel azalma olarak adlandırılır. Bu hacimsel azalma kimyasal reaksiyon ve boşluk içerisindeki suyun hareketinden kaynaklanmaktadır.

Çeşitli nedenlerle betondan uzaklaşan su, betonun içinde iç gerilmelere ve boyutsal kararlılığın değişmesine neden olur. Oluşan bu iç gerilmeler betonun çekme dayanımını aştığında çatlaklar meydana gelir (Holt ve Leivo 2004). Bu yüzden betonun rötiresi ve sebebiyet verdiği çatlakları kaliteli bir beton üretimi açısından dikkate alınması gereken özelliklerdir (Topçu 2006). Bilindiği gibi rötire sonucu oluşan mikro ve makro çatlaklar, beton içerisine zararlı maddelerin girmesine imkan verir ve yapının dayanıklılığını tehdit eder ve dolayısıyla servis ömrünü azaltır (Mehta 1986).

Betonun rötiresini çimento hamurunun boşluk oranı, yaşı, hidrasyon derecesi, s/ç oranı, kür sıcaklığı, çimento içeriği, su içeriği, kimyasal ya da mineral katkıların özellikleri, agrega içeriği, agrega granülometrisi, agrega elastiklik özellikleri, agrega hacim-yüzey oranı, agrega kil içeriği, hafif agregalar, bağlı nem, kuruma derecesi ve zamanı gibi koşullar rötreyi etkilemektedir (ACI 209.1R 2005).

### **2.2. Rötire Türleri**

Rötire, 4 farklı şekilde sınıflandırılabilir. Bunlar;

1. Plastik Rötire,
2. Kuruma Rötiresi,
3. Otojen Rötire ve
4. Karbonatlaşma Rötiresi'dir.



### 2.2.1. Plastik Rötne

Taze beton kalıba yerleştirildikten sonra karışımda var olan su kılcal yollarla betonun yüzeyine doğru hareket eder ve bu olaya ‘Terleme’ denir. Yüzeğe çıkan su, rüzgâr, sıcaklık ve nem farklılıklarının etkisiyle buharlaşır. Eğer yüzeydeki buharlaşma hızı, terleme hızından fazlaysa betonda “plastik rötne” oluşur. Henüz dayanımını almamış beton, plastik rötne sonucu oluşan çekme gerilmelerini karşılayamaz ve ağısı bir şekilde oluşan çatlaklara sebebiyet verir (Mehta 1986).

Plastik rötrenin oluşum nedeni, beton karışımında kullanılan ve kimyasal reaksiyona girmeyen, işlenebilirliği sağlayan fazla suyun boşluklardan kapilarite yoluyla yukarı çıkmasıdır. Betonun yerleştirilip perdahlanmasından 2-4 saat sonra yüzeyde parlama şeklinde görülür. Yüzeğe çıkan bu suyun dış etkiler sebebiyle buharlaşması sonucu betonun yüzeyi kuruyup matlaşır. Çimento hamurunun kurumması sonucu, önce kılcal boşluklardaki su buharlaşmakta, bu boşluklara jel suyu akımı başlamakta ve daha sonra bu su da kısmen buharlaşmaktadır. Sonuçta taneler birbirine yaklaşarak hacim büzülmektedir. Büzülen çimento harcı, iri agrega veya donatı tarafından engellenirse, henüz çekme dayanımı yeterli olmadığı için beton kolayca çatlar (Baradan 2002).

Şekil 2.1.’de ağısı bir şekilde oluşmuş plastik rötne çatlakları görülmektedir.



**Şekil 2.1:** Plastik Rötne Çatlakları

Taze beton yüzeyindeki suyun buharlaşma hızı  $0,5 \text{ kg/m}^2/\text{saat}$  ten daha çok olduğu takdirde, plastik rötre çatlakları oluşmaktadır. Plastik rötreye neden olan bir diğer etkende beton kütleindeki suyun bir miktarının beton taban malzemesi ve kalıplar tarafından emilmesidir. Plastik rötre ve buna bağlı olarak oluşan çatlaklar çoğu zaman beton döşemeler ve park yerleri gibi geniş yüzey alanına sahip betonlarda görülmektedir. Bu çatlaklar, basınç dayanımını ciddi mertebede etkilemezken, yapının dayanıklılığını ve servis ömrünü olumsuz etkiler. (Baradan 2010)

Plastik rötreyi engellemek için; rüzgara açık inşaat alanlarında rüzgarın taze beton yüzeylerine direkt olarak temas etmesi önlenmelidir. Güneş ışığına açık inşaat alanlarında kuru ve sıcak havalarda geniş yüzeyli betonlar tercihen gece dökülmelidir. Ayrıca, yüzeyde su kaybını engellemek için su püskürtme veya kimyasal kür malzemesi gibi işlemler taze beton yüzeyine uygulanmalıdır. Soğuk havalarda ise betonu fazla ısıtmaktan kaçınılmalıdır. İstenilen kalitedeki beton karışımı, mümkün olabildiği kadar düşük su/çimento oranlarında elde edilmelidir (Lin 2003).

### **2.2.2. Kuruma Rötresi**

Kuruma rötresi, sertleşmiş betondaki suyun buharlaşarak kaybolması sonucu oluşan büzölmeye denir. Söz konusu bu rötre, üretimi izleyen gün başlar ve 5-6 ay süreyle yavaşlayarak devam edebilir. Bu yüzden kuruma rötresi hem erken yaşta hem de uzun dönemde oluşan bir rötre türüdür (Neville 1997).

Sertleşmiş çimento hamuru jel yapıdadır. Yani katı taneciklerin adsorpladığı su molekülleri, bu tanecikleri bir arada tutan, bağlayan elektrostatik kuvvetleri oluştururlar. Adsorbe su tabakası inceldikçe taneleri birbirine doğru çeken kuvvetler artmakta, su tabakası kalınlaştıkça azalmaktadır. Çimento hamurunun kurumması sonucu, önce kılcal boşluklardaki su buharlaşmakta, bu boşluklara jel suyu akımı başlamakta ve daha sonra bu su da kısmen buharlaşmaktadır. Sonuçta adsorbe su tabakası incelerek ve taneler yaklaşarak hacim azalmaktadır. İlginç olan, büzölmenin herhangi bir dış yük altında olmamasıdır. Bir dış yükleme halinde jel suyunun hareketi hızlanacak ve çimento

hamurunun boyutları daha da küçülecektir. Büzülen çimento hamuru tekrar suya batırıldığı takdirde adsorbe su tabakası kalınlaşıp, taneler birbirinden uzaklaşır. Sonuçta hacim artar ve bu olaya da şişme adı verilir. Çimento hamurunun tamamen su içinde bulunması halinde görülen şişme olayı mutlak değer olarak rötreden azdır (Baradan 2010).

Beton dökümünden sonra çevre şartlarına göre ısı dengesi sağlanana kadar betonun çevresiyle ısı alışverişi sürer. Eğer yüzeydeki ısı, iç ısıdan daha az ise beton içindeki su, ısı dengesi sağlanana kadar buharlaşır. Beton ve çevresi arasındaki nem farkı da su buharı transferine neden olur. Ortamın rutubeti, betonun kendi rutubetinden daha az ise, buharlaşma rutubetin fazla olduğu taraftan az olduğu tarafa devam edecektir. Bunun sonucunda betonda mikroskobik boyutta büzülme meydana gelir, bu olaya “kuruma rötresi” denir (Kadioğlu 2006).

Şekil 2.2’de otopark zemin kaplamasında oluşmuş kuruma rötresi çatlakları görülmektedir.



**Şekil 2.2:** Otopark zemin kaplamasında kuruma rötresi çatlakları (Kadioğlu, 2006)

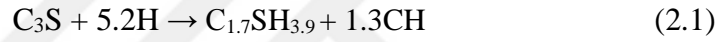
Çimento ve agrega özellikleri, su/bağlayıcı (s/b) oranı, agrega türü, sıcaklık, nem, rüzgâr hızı vb. etmenler kuruma rötresini etkilemektedir (Huo ve Wong 2000, Lin 2003). Kuruma rötresinin ana mekanizmasını yüzey gerilimi ve kapiler gerilme oluşturur (Lin 2003).

Kuruma rötresinin beton yüzeyinde ve alt bölgelerinde farklı değerlerde olması özellikle

plaka betonlarda kıvrılmaya neden olur. Bu da, rötrenin sebep olduğu çatlaklar dışında, trafik yükü ve beton plağının kendi ağırlığının bükülmüş beton plağını zorlamasıyla ekstra çatlaklar oluşacaktır. (Bissonnette 1996)

### 2.2.3. Otojen Rötire

Otojen rötire ilk olarak 1900 yılında Le Chatelier tarafından açıklanan ‘Kimyasal Rötire’ tanımıyla başlamıştır. Le Chatelier, çimento ve suyun hidrate olması sonucu ortaya çıkan ürünlerin hacminin tepkimeye giren çimento ve sudan daha az olduğunu belirtmesiyle başlamıştır (Polat 2013). Bunu daha iyi anlamak için Denklem 2.1’de gösterilen basitleştirilmiş C<sub>3</sub>S hidratasyonu incelenebilir.



$$72.4 + 93.6 \rightarrow 112.1 + 42.9 \text{ cm}^3$$

$$166 \rightarrow 155 \text{ cm}^3$$

Örnek olarak verdiğimiz denklemde görüldüğü gibi hidratasyon sonucu oluşan ürünlerin toplam hacmi yaklaşık %6,6 oranında küçülmüştür.

Otojen rötire tanımı ise 1934 yılında Lynam tarafından yapılmıştır. Lynam (1934), otojen rötrenin rüzgar, yük, bağıl nem veya kür gibi dış etkilerden etkilenmediği ve kendi içerisindeki hidratasyon sonucu oluşan hacim değişikliği olduğunu belirtmiştir.

Otojen rötreyi, düşük su/çimento oranı ve yüksek çimento içeriği etkiler. S/b oranının artmasıyla otojen rötire azalmaktadır (Chandra ve ark. 1997). Önceki yıllarda işlenebilirliği arttırmanın en basit yolu su/çimento oranını arttırmak olduğundan otojen rötire yapı için ciddi bir tehdit değildi. Bu yüzden otojen rötire, kuruma rötresine göre çok daha düşük mertebelerde kaldığı için uzun süre araştırmacıların ilgisini çekmemiştir. 1980’lerden sonra süper akışkanlaştırıcıların kullanımıyla beraber daha düşük su/çimento oranında yüksek dayanımlı betonlar üretilmeye başlamış ve otojen rötrenin neredeyse kuruma rötresiyle aynı

mertebeyle ulaşması sonucu son yıllarda otojen rötire araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Normal dayanımlı betonlarda 5 yıl sonunda 100 strain mertebesinde olan otojen rötire, düşük su/çimento oranına sahip yüksek dayanımlı betonlarda 700 strain gibi büyük mertebelere çıkmaktadır (Zhang 2003).

Otojen rötire sonucu herhangi bir ağırlık değişimi olmazken yani suyun buharlaşarak betondan uzaklaşması söz konusu değilken sadece mikroskobik ölçekte bir hacim değişikliği söz konusudur. Son yıllarda yüksek çimento içeriği ve düşük su/çimento oranına sahip yüksek dayanımlı betonların üretilmesiyle beraber araştırmacılar otojen rötire sonucu oluşan söz konusu hacimsel değişikliği önlemenin yollarını araştırmıştır. Bir nevi iç kür görevi gören suya doğun kuru yüzey agrega kullanılarak otojen rötirenin olumsuz etkisinin azaltılabileceği belirtilmiştir (Mardani Aghabaglou 2015). Aynı zamanda, yüksek inceliğe sahip silis dumanı gibi mineral katkıların kullanılması beton içerisindeki boşlukları doldurup geçirimsizliği azalttığı için söz konusu rötreyi olumsuz etkilemektedir.

#### **2.2.4. Karbonatlaşma Rötresi**

Çimento hamurunda bulunan  $\text{Ca(OH)}_2$ 'in ve atmosferde bulunan  $\text{CO}_2$ 'in tepkimeye girmesi sonucu oluşan rötire çeşidine 'Karbonatlaşma Rötresi' denir. Bu rötire sonucu diğer rötire türleri gibi su ve ağırlık kaybı olmaz aksine ağırlık artışı bile söz konusu olabilir (Kadıoğlu 2006).

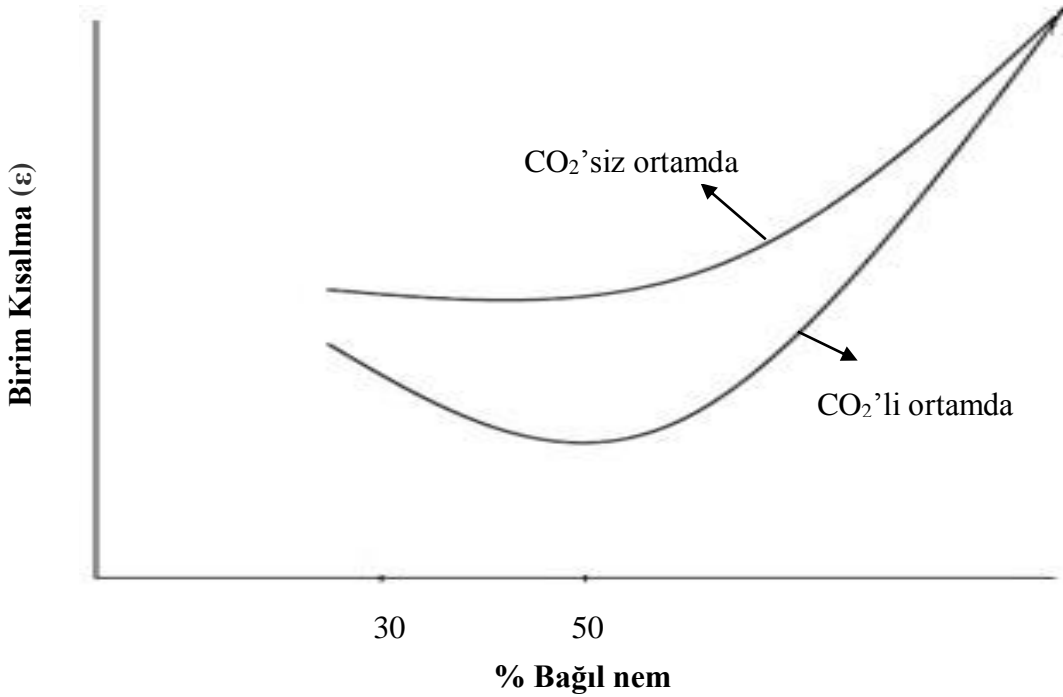
Plastik haldeki beton, bünyesinde bulunan  $\text{Ca(OH)}_2$  sayesinde yüksek alkali derecesine sahiptir. Daha sonra beton bünyesine giren sular  $\text{Ca(OH)}_2$ 'i çözer ve dolayısıyla betonun alkali derecesi düşer. Eriyik hale gelen  $\text{Ca(OH)}_2$  kapiler hareket sayesinde beton yüzeyine yükselir ve atmosferde bulunan  $\text{CO}_2$  ile tepkimeye girer. Söz konusu tepkime sonucunda  $\text{CaCO}_3$  oluşur (ACI 209.1R 2005).



Denklem 2.2'de görüldüğü gibi, reaksiyon sonucu  $\text{CaCO}_3$ 'a ilaveten su da oluşur. Meydana gelen bu suyun beton yüzeyinden buharlaşması sonucu karbonatlaşma rötresi gerçekteşir. Fakat tepkime sonucu bir miktar su buharlaşsa da oluşan  $\text{CaCO}_3$  hacim

artışına sebebiyet verebilir.  $\text{CaCO}_3$  sonucu oluşan hacim artışı ve oluşabilecek korozyon riski bir takım boyutsal değişikliğe neden olabilir.

Karbonatlaşma rötresini, karbondioksitli ve karbondioksitsiz ortam şartlarında bağıl nemin etkisiyle gösterdiği davranış şekilinde gösterilmiştir (Verbeck 1968).



**Şekil 2.3:** CO<sub>2</sub> 'li ve CO<sub>2</sub> 'siz ortamda beton numunesinin bağıl nem etkisiyle birim boy değişimi (Verbeck 1958)

Şekil 2.3'ten de anlaşıldığı gibi, CO<sub>2</sub> yaklaşık %50 bağıl nemde kuruma rötresini arttırmıştır. Yüksek nem ve doymuş su koşullarında numuneler genellikle karbondioksit emmez. Aynı şekilde %30 dan az bağıl nemde karbondioksit ile reaksiyon azalır. Karbonatlaşma, betonun dayanımını artırırken karbonatlaşma sonucu ortaya çıkan kalsiyum karbonat , genişleyen hacmi dolayısıyla betonun boşluklarını azaltır. Böylece betonun geçirimsizliği de azalır. Ancak betonun alkalitesi kalsiyum karbonat nedeniyle azalır. Karbonatlaşma, çoğunlukla havayla direkt temas eden yüzeylere yakın bölgelerde meydana gelir. Beton yüzeyinden donatıya yaklaşırsa, donatıda korozyon tehlikesi başlar (Mindess 1981).

### 2.3. Rötreye Etki Eden Faktörler

Bu çalışmada, rötreye etki eden faktörler;

1. Çimento Özelliklerinin Etkisi
2. Su/Çimento Oranının Etkisi
3. Agreganın Etkisi
4. Mineral Katkı Kullanımının Etkisi
5. Bazı Kimyasal Katkıların Kullanımının Etkisi
6. Betonun Boşluk Yapısının Etkisi
7. Ortam Sıcaklığının Etkisi
8. Bağıl Nem Etkisi olmak üzere 8 başlıkta incelenmiştir.

#### 2.3.1. Çimento Özelliklerinin Etkisi

Betonun yaklaşık %65'lik kısmını agregaların oluşturmasına rağmen betonda rötreyi etkileyen en önemli parametrelerden biri çimento fazıdır. Bu sebeple çimento özelliklerinin rötreye etkilerini anlamak için öncelikle çimento ve çimentonun kimyasal yapısını kavramak gerekmektedir.

Bilindiği üzere, Portland çimentosunun 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. Portland çimentosunun yaklaşık %65'ini oluşturan kalsiyum oksit (CaO) ve klinker üretim aşamasında döner fırında yüksek sıcaklıkta alüminyum oksit, demir oksit ve silisyum oksit ile reaksiyona girerek çimentonun anabileşenleri olan  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  ve  $C_4AF$ 'yi oluşturur (Mehta 1986). Bu anabileşenlerin her biri su ile ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve hidratasyon sonucundan her anabileşen tarafından değişik hidratasyon ürünleri oluşmaktadır.

Portland çimentosunu oluşturan her bir anabileşenin kendine özgü reaksiyon hızı, tepkime ısı ve dayanımı gibi özellikleri mevcuttur. Buna bağlı olarak betonun dayanım, dayanıklılık gibi karakteristik özellikleri şekillenir ve betonun rötresi farklı şekillerde etkilenir.

Çimento anabileşenlerinin bazı karakteristik özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

**Çizelge 2.1:** Çimento Anabileşenlerinin Bazı Karakteristik Özellikleri (Mehta 1986)

	<b>C<sub>3</sub>S</b>	<b>C<sub>2</sub>S</b>	<b>C<sub>3</sub>A</b>	<b>C<sub>4</sub>AF</b>
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Yavaş
Oluşan Isı	Yüksek	Düşük	Çok Yüksek	Orta
İlk Dayanım	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük
Nihai Dayanım	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

Çizelge 2.1’den de anlaşıldığı gibi, çimentonun erken dayanım kazanması C<sub>3</sub>S ve C<sub>3</sub>A etkisinde gerçekleşir. Erken dayanıma etkisi olan sağlayan C<sub>3</sub>A miktarının fazla olması hızlı priz alma, düşük slump ve çimento bileşiminde uyuşmazlığa neden olacaktır. Hızlı sertleşme ve buna bağlı olarak hidrasyon ürünlerinin homojen bir şekilde dağılmaması sonucu karışımda yüksek su kaybı ve yüksek geçirimsizlik gibi olumsuzluklar oluşacağından, rötre riski de artabilir (Previte 1977, Whiting 1981).

C<sub>3</sub>S ve C<sub>2</sub>S nihai dayanımda çimentonun kendi karakteristik özelliklerini belirlemede etkili bileşendir. C<sub>3</sub>S miktarının artması, hızlı hidrasyon ve dolayısıyla betonun erken dayanım kazanmasını sağlayacaktır. Ancak bu erken dayanım zamanla nihai dayanım değerlerinin düşük kalmasına sebebiyet verecektir. Rötre açısından düşünürsek, erken priz alma rötrenin artışı demek olacaktır. C<sub>2</sub>S, hidrasyonu yavaşlatır ancak uzun dönemde C-S-H jelinin düzenli gelişmesi sonucu nihai dayanım değerini artırır. Yavaş hidrasyon özelliği sayesinde C<sub>2</sub>S özellikle otojen rötrenin azalmasını sağlar. (Meyer ve Perenchio, 1979)

Bilindiği gibi, C<sub>3</sub>A suda kalsiyum (Ca) ve sülfat (SO<sub>4</sub>) tuzları ile reaksiyona girmesi sonucu etrenjiti oluşturur. Etrenjit oluşumu, hamur fazında genleşmeye sebep



olacağından çatlak oluşumuna yol açar. Bu çatlakların varlığı sülfat atağına karşı betonun savunmasız kalmasına ve dayanıklılığının ve servis ömrünün azalmasına neden olur (Verbeck 1968, Neville 2000).

Özellikle otojen rötre olayında, çimento kompozisyonun önemli bir etkisi vardır.  $C_3A$  ve  $C_4AF$  miktarı fazla olan, erken yaş dayanımları yüksek olan çimento tipleri daha büyük miktarlarda otojen rötreye neden olurlar.  $C_2S$  miktarı fazla olan, tepkime sonucu açığa daha düşük ısı meydana getiren çimento tipleri ise daha düşük miktarlarda otojen rötreye sebebiyet verirler.  $C_3A$  ve  $C_4AF$ 'nin etkileri  $C_3S$  ve  $C_2S$ 'e göre 10~20 kat mertebesinde olabilmektedir (Tazawa ve Miyazawa 1997).

Açıkça görülmektedir ki çimento bileşimi ve çimento tipi tercihi istenilen özelliklere sahip beton için çok önemlidir. Bu yüzden, betonun dayanıklılığını ve servis ömrünü tehdit eden rötre ve rötre çatlaklarına maruz kalmamak için çimento tipleri ve karakteristik özellikleri iyi bilinmelidir. Türkiye'de TS EN 197-1 Türk Standardı esas alınarak beş ana tip çimento üretilmektedir. TS EN 197-1'e göre üretilen çimentolardan CEM II Portland Kompoze Çimentosu ise kendi içinde yedi farklı alt sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar kullanılan mineral katkı cinsi ile birbirinden ayrılmaktadır. Bunun dışında çimentonun içerdiği katkı miktarının en az ve en çok olması esasına dayanan bu beş ana tip çimentonun altında 27 tip farklı çimento üretilmektedir. TS EN 197-1'de; CEM I Portland Çimentosu, CEM II Portland Kompoze Çimento, CEM III Portland Yüksek Fırın Cürüflü Çimento, CEM IV Puzolanik Çimento ve CEM V de Kompoze Çimento olarak tanımlanmaktadır.

TS EN 197-1 standardına göre, çimentoların anabileşen içeriği ve karakteristik özelliği Çizelge 2.2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Çimentoların karakteri ve kullanıldığı yerler (Erdoğan 2003)

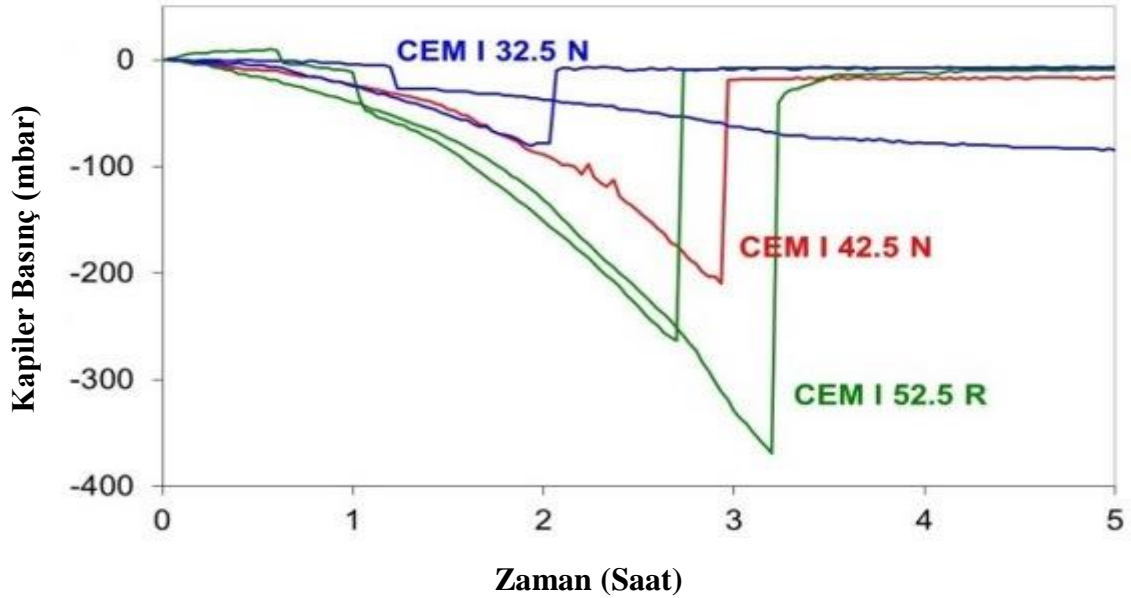
Çimento Tipi	Karakteristik Özelliği	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
CEM I	Her türlü beton yapımında; genel amaçlar için kullanılır.	49	25	12	8
CEM II	Daha az hidrasyon ısısına ve daha çok sülfat dayanımına sahiptir.	46	29	6	12
CEM III	İlk dayanımı yüksek çimento tipidir.	56	15	12	8
CEM IV	Hidrasyon ısısı yayınının az olması gereken kütle betonu dökümlerinde tercih edilen tipdir.	30	46	5	13
CEM V	Aşırı sülfatlara maruz kalan beton işlerinde kullanılan çimento tipidir.	43	36	4	12

Çizelge 2.2'den anlaşıldığı gibi, her bir çimento sınıfı farklı amaçlara hizmet etmektedir ve rötreye karşı her biri farklı davranış göstermektedir. Rötreye hususunda özellikle, hızlı hidrate olan ve ısı açığa çıkaran C<sub>3</sub>S ve C<sub>3</sub>A içeriği yüksek çimentolardan sakınmak gerekir. Bu bağlamda, erken yaş dayanımı yüksek olan CEM III tipi çimentodan sakınmak gerekir.

Ayrıca, betonun rötresini etkileyen ana parametrelerden biri olan çimentonun dozajı arttıkça betonun rötresi de artacaktır. Aynı tip çimentonun öğütülerek daha ince hale getirilip betonda kullanılması durumunda ise su ihtiyacı ve dayanım artacaktır. Su ihtiyacının artması plastik rötreye ve kuruma rötresini, dayanımın artması ise boşluk oranının azalması sonucu otojen rötrenin artmasına sebebiyet vermektedir (Neville 2000).

Şekil 2.4'te Lura ve arkadaşlarının (2005), yaptığı bir çalışma kapsamında üretilen numunelerin negatif kapiler basınç grafiği gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, çimento inceliği arttıkça negatif kapiler basınç da artmaktadır. Bilindiği gibi, negatif kapiler basıncın artması rötreye ve rötreye çatlakları oluşumu riskini de arttırmaktadır.

Lura ve arkadaşlarının (2005), CEM I 32,5 N, CEM I 42,5 N ve CEM I 52,5 R çimentoları kullanılarak ve sabit su/çimento oranlarında yaptığı çalışmada, CEM I 32,5 N ile üretilen 4 numunede de çatlak oluşmamıştır. CEM I 42,5 N ile üretilen 4 numuneden 2'sinde, CEM I 52,5 R ile üretilen 4 numuneden 3'ünde çatlak oluşmuştur. Şekil 2.4'ten de anlaşıldığı gibi, çimento inceliği arttıkça rötreye olumsuz şekilde etkilenmektedir.



Şekil 2.4: Çimento tipinin kapiler basınç üzerine etkisi (Lura 2005)

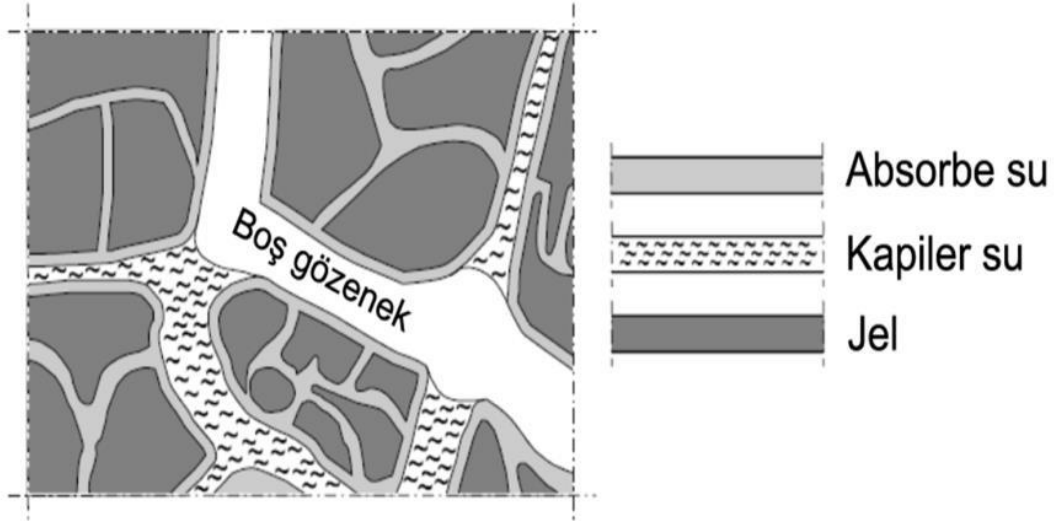
### 2.3.2. Su/Çimento Oranın Etkisi

Rötreye, en genel tabirle betondan suyun uzaklaşması sonucu oluşan hacimsel küçülmedir (Mehta 1986). Bu bağlamda, rötreyi etkileyen en önemli parametre su/çimento oranıdır. Çimentonun hidrasyonu için gerekli olan sudan daha fazlası bilindiği gibi betonda

işlenebilirliği sağlamaktadır. Farklı sebeplerden ötürü, bu suyun beton bünyesinden uzaklaşması rötreye sebebiyet vermektedir. Su/çimento oranı arttıkça işlenebilirliği sağlayan su miktarı da artacak ve daha fazla rötreye gerçekleşecektir.

Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, sertleşmiş çimento hamurunda su 3 farklı şekilde bulunur. Bunlar; kimyasal, fiziksel ve serbest sudur (Akçay 2007). Kimyasal olarak bağlı su; buharlaşamayan sudur ve jel yapısının tamamlayıcı bölümüdür. Bu yüzden, kimyasal olarak bağlı suyun miktarı hidrasyonun derecesini belirlemek için kullanılır (Jennings 1988). Powers'a (1947) göre, bu su kimyasal olarak çimento ile birleşmiş olan sudur. Bu su, ancak çok yüksek sıcaklıklarda (400°C) çıkabilir (Salem 1996). Fiziksel olarak bağlı su; van der Waals bağlarıyla çimento jelinin yüzeylerinde tutulan sudur. Bu çok küçük jel boşluklarının duvarlarındaki çekim kuvvetinin etkisi ile tutulur. Mehta'ya (1986) göre hidrojen bağlarıyla fiziksel olarak tutulan su 6 molekül tabakaya kadar çıkabilir. Bu su çıktığı zaman hamurda rötreye meydana gelir (Salem 1996). Kapiler su-serbest su; hidrasyonun devam etmesi için gereklidir, fiziksel olarak bağlı sudur ve buharlaşabilir. Kapiler sular eğer herhangi bir sebeple buharlaşırlarsa, kapiler boşluklar oluşur ve geniş jel boşlukları katı yüzeylerinde hidrostatik basınç uygularlar. Bu basınç hidrate olmuş çimento hamurunda rötreye ve çatlak gibi mikroyapıda kalıcı şekil değişiklikleri meydana getiren CSH yapısına zarar verir. Kapiler su, sertleşmiş hamurda, hidrate olmuş çimento tanelerinin arasındaki büyük boşluklarda (genellikle 50 A°'dan büyük) bulunur. Onun fiziksel özellikleri serbest su gibidir. Çünkü yüzeysel çekim kuvvetlerinden bağımsızdır. 50 nm'den daha büyük kapiler boşluklardaki su, serbest su olarak bilinir, çünkü bu suyun çıkışı, dayanım ve permeabiliteyi etkilemesine rağmen, hacim değişikliğine sebep

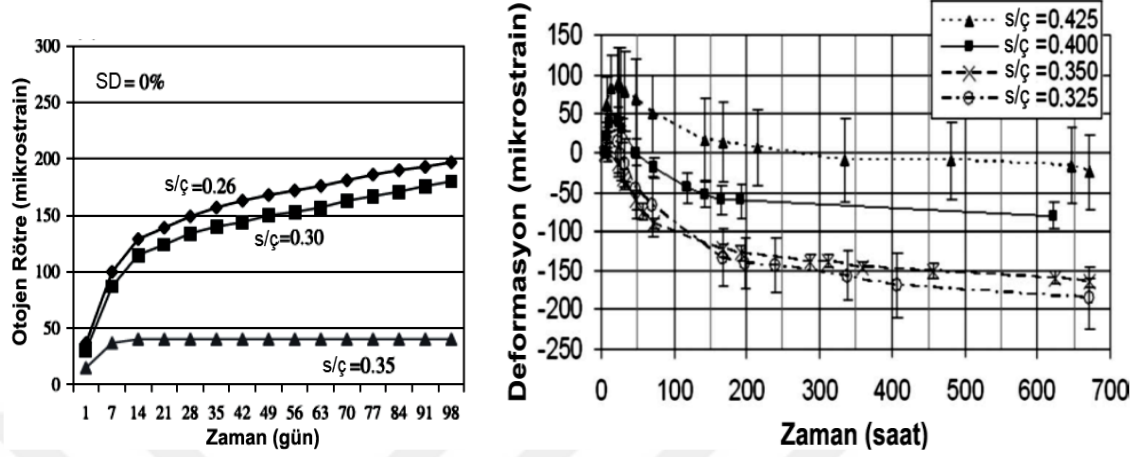
olmaz (Salem 1996). 50 nm'den küçük kapiler boşluklardaki su, kapiler çekim kuvvetleriyle tutulur ve çıkışı halinde rötreye sebep olur (Salem 1996).



**Şekil 2.5.** Çimento hamurunun boşluk sisteminde suyun şematik gösterimi (Breugel 1991)

1980'li yıllardan önce, betonda işlenebilirliği sağlamanın en basit yolu su/çimento oranını arttırmaktı. Bu ise rötrenin artmasına ve rötreye çatlaklarının ciddi mertebelere çıkmasına neden olmaktadır (Baradan 2010). 1980'li yıllarda su azaltıcı katkı kullanımıyla beraber betonda işlenebilirlik rahatlıkla sağlanmaya başladı ve daha düşük su/çimento oranına sahip yüksek dayanımlı betonlar üretildi. Yüksek su/çimento oranına sahip betonlarda otojen rötreye yapı için önemsenmeyecek mertebelerde iken, su/çimento oranının düşmesiyle otojen rötreye miktarının arttığı tespit edildi. Normal dayanımlı betonlarda otojen rötrenin tipik değerleri kuruma rötresine göre daha düşük, 1 aylık zamanda  $40 \times 10^{-6}$  ve 5 yıllık değerleri ise  $100 \times 10^{-6}$  olmaktadır (Davis 1940). Bu nedenle otojen rötreye, normal dayanımlı betonlarda pek fazla dikkate alınmamaktadır. Düşük s/b oranlı betonlar için, otojen rötreye önemli düzeyde gerçekleşmektedir. Aitcin ve arkadaşlarına (1997) göre otojen rötreye, s/b oranı 0,42'den büyük ise önemli büyüklükte olmamaktadır, fakat 0,42 den az ise önemli büyüklükte olmaktadır ve erken yaşlarda hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Hatta su bağlayıcı oranı 0,17 olan karışımlarda, otojen rötrenin  $700 \times 10^{-6}$  gibi yüksek değerlere çıktığı belirtilmiştir (Zhang ve ark. 2003).

Şekil 2.6’te görüldüğü gibi su/çimento oranı azaldıkça otojen rötre artmaktadır. Hatta su/çimento oranı 0,26 iken rötre miktarı 200 mikrostrain mertebelerine çıkmaktadır.

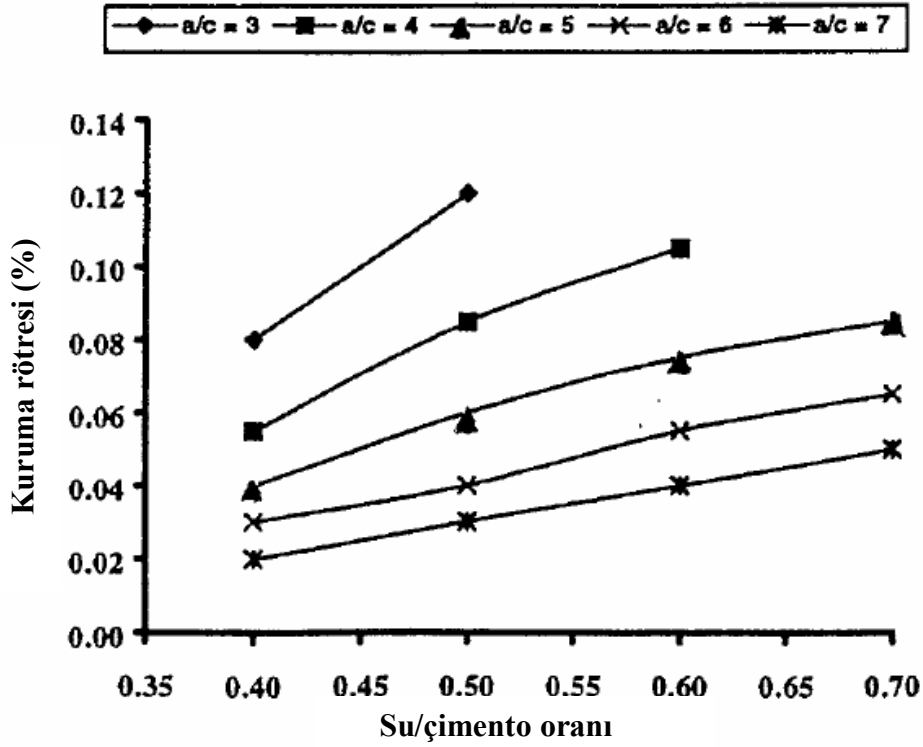


Şekil 2.6. Betonun otojen rötresinde s/ç oranının etkisi (Zhang ve ark. 2003, Bentz ve ark. 2009)

Özetle su/çimento oranının rötre hususunda en önemli parametre olduğunu ve hassas olarak dizayn edilmediğinde ciddi mertebelerde rötreye sebebiyet verdiğini görmekteyiz. Su/çimento oranı arttıkça kuruma rötresi, azaldıkça ise otojen rötre ve plastik rötre artmaktadır. (Soroushian 1998, Samman 1996, Tawaza 1997)

### 2.3.2. Agreganın Etkisi

Betonu oluşturan malzemeler içinde elastisite modülü en yüksek olan malzeme bilindiği üzere agregadır. Agreganın söz konusu bu rijitliği betonun şekil değiştirme davranışını kısıtlar. Ayrıca agrega miktarının fazla olması çimento hamuru miktarının azalmasını sağlayacak ve betonun rötre davranışı daha olumlu etkilenecektir.



**Sekil 2.7 :** Agregat/çimento ve su/çimento oranlarının kuruma rötresine etkisi (Bruno D'Souza 2005)

Şekil 2.7'de görüldüğü gibi, agrega miktarı arttıkça rötreye azalmaktadır. Agregat/çimento oranı 7 olan karışımın rötresi %0,2 iken aynı su/çimento oranına sahip agregat/çimento oranı 3 olan diğer karışımın rötresi yaklaşık 3 kat daha fazla olup, %0,8 olarak ölçülmüştür. Ayrıca agrega miktarı fazla olan karışımlarda, su/çimento oranı arttıkça rötrenin daha düşük ivmeli artışı görülmüştür fakat agrega miktarı azaldıkça rötreye daha şiddetli bir artış göstermiştir. Bu çalışmadan, agrega miktarının fazla olmasının rötreyi nasıl olumlu etkilediği açıkça anlaşılmaktadır.

Agregat çeşidi rötreye üzerinde etkili iken agrega maksimum tane çapı, rötreyi ciddi oranda etkilememektedir (Bissonnette 1996). Agregat cinsinin rötreye etkisini inceleyen bir çalışmada, kireçtaşı, kırmataş ve granit olmak üzere, üç farklı tip agrega ile yüksek mukavemetli beton numuneleri üreterek bunların rötreye miktarları gözlemlenmiştir. Buna göre en az rötreye yapan numune, en yüksek erken elastisite modülüne sahip kireçtaşı agregatlı numune olmuştur (Han 1994). Bilindiği üzere hafif agregatların, normal veya ağır agregatlarla oranla daha az elastisite modülüne sahip oldukları, yani daha boşluklu yapıda oldukları bilinmektedir. Dolayısıyla normal agregatlarla kıyaslandığında hafif

agregalı beton numunesi daha fazla rötre yapacaktır. Ancak, ıslatılmış hafif agregalar kullanılarak yapılan beton numunelerinin normal veya ağır agregalar kullanılarak yapılan numunelerden daha az rötre yaptığı da gözlemlenmiştir. Boşluk oranı yüksek olan hafif agregaların boşluklarındaki su, rötreyi daha fazla belirleyici bir etken olmuştur (Mokarem 2002).

Agrega içerisinde bulunabilen boşluklardaki sular, çimento hamurunun hidrasyonunun ilerlemesi için kullanılır ve bu su beton içerisindeki içsel kurumayı önlemektedir. Bu amaçla yapılan çoğu araştırmalarda, beton içerisinde suya doymuş hafif agregaların kullanımının içsel kürlenme görevi görerek otojen rötre miktarını azalttığı belirtilmiştir (Lura ve ark. 2001, Zhutovsky ve ark. 2002, Holt ve Leivo 2004, Mardani Aghabaglou 2013)

Betondaki otojen rötre miktarının sebebi olan içsel su tüketiminin içeriden ek su ile takviye edilmesi gerekmektedir. Normal dayanımlı betonlarda rötre oluşumunun engellenmesi ya da azaltılması amacıyla kullanılan dışarıdan kür yöntemleri, yüksek dayanımlı betonların ince boşluklu, yoğun ve geçirimsiz yapısında etkili olmamaktadır. Söz konusu bu tip betonların düşük geçirimsizliğinden dolayı betonun iç kısımlarına dışarıdan uygulanan kür yöntemleriyle su girmemektedir. Bu yüzden betonun kürünü çimento hamuru içerisinde gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu sebeple, su emme oranı yüksek hafif agregaların suya doymuş hale getirilerek beton üretiminde kullanılması bir nevi içsel kür görevi görerek deformasyondan dolayı nem kaybının önlenmesi için kullanılan bir yöntemdir (Bentz ve Stutzman 2006).

#### **2.3.4. Mineral Katkı Kullanımının Etkisi**

Betonda çimento tasarrufu hiç şüphesiz ekonomik açıdan önemlidir. Ancak, çimento miktarında yapılacak eksiltmenin önemli başka yansımaları vardır. İşlenebilirlikten taviz vermeden çimento tasarrufu yapmak zor bir durumdur ve geleneksel düşünce anlayışı ile bunu gerçekleştirmek zordur. Çimentoda yapılacak körü körüne bir eksiltme sonuçta fiziksel olarak daha boşluklu bir beton yapısı doğurabilir. Hiç şüphesiz boşluklu bir beton, zararlı dış ortam koşullarına karşı korunmasızdır ve hem dayanım hem de dayanıklılık bakımından yetersiz olur. Dolayısıyla, eksiltelen çimento,



hacmi oranında bir malzeme ile mutlaka ikame edilmelidir. Doğal puzolanlar, uçucu küller, ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile silis dumanı gibi mineral katkıları bu amacı gerçekleştirmek adına kullanılacak malzemelerdir. Mineral katkı maddelerinin beton üretiminde kullanımının ekonomik faydası yanı sıra ekolojik yararı da söz konusudur. Mineral katkıların beton üretiminde kullanılması yarattığı ekonomik ve ekolojik olumlu etkilerin yanı sıra inceliği çimentoya yakınsa işlenebilirliği de olumlu etkileyeceği bilinmektedir (Erdoğan 2003).

Mineral katkı kullanımının kullanılan katkı oranı, inceliği veya mineral katkı tipine bağlı olarak rötre tiplerine farklı etkileri bulunmaktadır. Bilindiği üzere, mineral katkıları genelde çimentoya göre daha ince tanecikli malzemeler olduğu için, toplam yüzey alanı ve buna bağlı olarak su ihtiyacı artarken betonun dayanımı ve boşluk oranı da azalmaktadır. Su ihtiyacı fazla olan betonda plastik rötre oluşumu riskinin de artması beklenilmektedir. Buna ilaveten, mineral katkı kullanımına bağlı olarak betonun geçirgenliğinin azalması sonucu otojen rötre oluşumu riski de artabilir. Ancak, yapılan bazı çalışmalar ise mineral katkı miktarının artması ile rötrenin azaldığını ifade etmektedir (Mokarem 2002, Nawa 2004, Li 2012, Yoo 2012).

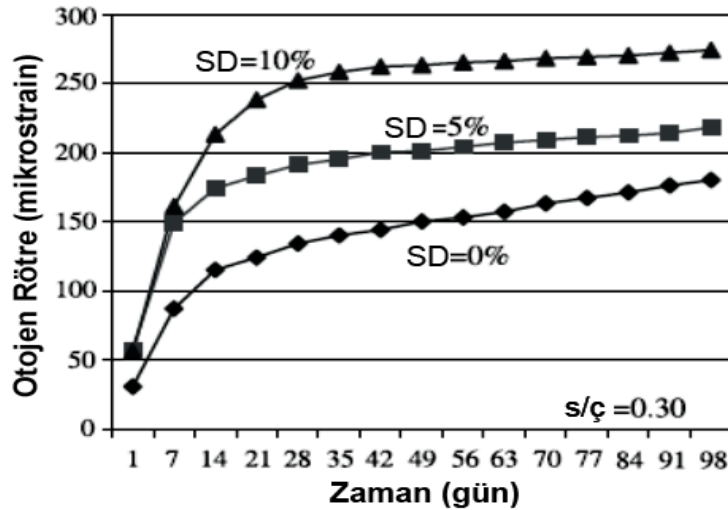
### ***Silis Dumanı***

Son yıllarda beton üretiminde yaygın bir biçimde kullanılan başka bir mineral katkı maddesi silis dumanıdır. Silis dumanı (SD), en az %75 oranında silisyum içeren silisyum veya ferrosilisyum alaşımlarının üretildiği tesislerin baca gazlarıyla taşınan çok ince bir endüstriyel atıktır. Baca gazlarından filtre edilerek tutulan ve amorf halde %85-95 oranında silis ( $\text{SiO}_2$ ) içeren bu atık, çapı ortalama 0.1 mikron olan küresel taneciklerden oluşur. Çimento taneciklerinin çapı ortalama olarak 10  $\mu\text{m}$  olduğu düşünülürse, silis dumanının çimentodan 100 kat daha ince olduğu anlaşılmaktadır. Silis dumanının yüksek puzolanik özellik göstermesi, inceliğinin ve içerdiği reaktif silis miktarının fazla olmasından kaynaklanmaktadır (Mehta 2006)

Atık bir malzeme olmasına rağmen silis dumanı yüksek puzolanik özelliğe sahip

olması nedeniyle hem bir yan ürün konumuna girmiş hem de diğer puzolanik malzemelerin içinde en kıymetlisi durumuna geçmiştir. Bu sebeple silis dumanı mineral katkıları içerisinde en çok kullanılanıdır (Erdoğan 2003). Silis dumanı taze halde betonun işlenebilirliğini azaltmakta iken sertleşmiş betonun bir çok özelliğini olumlu etkilemektedir (Khayat ve Aitcin 1992, Jahren 1993, Hooton 1993).

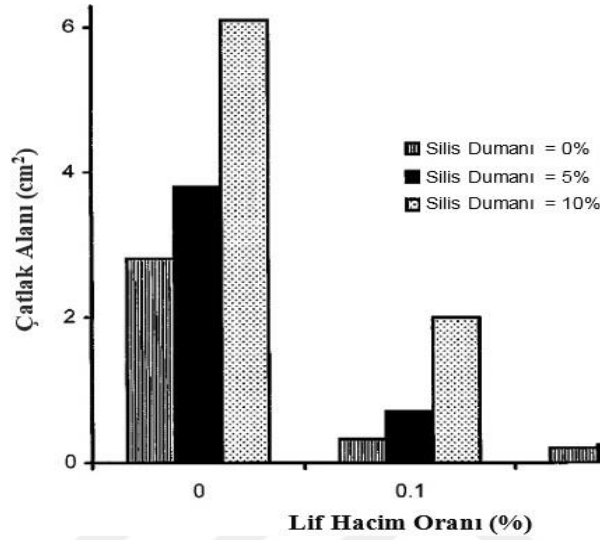
Silis dumanı, çimentoya göre daha ince taneli olması sebebiyle yüksek miktarda su ihtiyacına neden olur. Bilindiği gibi, su miktarının artması mukavemet, geçirimsizlik ve rötre açısından olumsuz etki oluşturmaktadır. Ayrıca, silis dumanı kullanımı beton içerisinde oluşturduğu ince boşluk yapısından dolayı otojen rötre oluşumu riskini de arttırmaktadır. Bu nedenle otojen rötre, silis dumanı kullanımıyla ve kullanım oranı artırıldığında artmaktadır (Zhang ve ark. 2003, Yoo ve ark. 2012). Silis dumanı kullanım oranının otojen rötre oluşumuna etkisi Zhang ve arkadaşları (2003) tarafından araştırılmıştır. Deney sonuçları Şekil 2.8’de özetlenmiştir. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, su/çimento (s/ç) oranı 0,3 olan 3 farklı karışımda en yüksek rötre en çok silis dumanı bulunan karışımda görülmüştür.



Şekil 2.8. Betonun otojen rötresinde SD'nin etkisi (Zhang ve ark. 2003)

Ayrıca, artan silis dumanı oranı, negatif kapiller basıncın daha erken oluşmasına sebep olmasından dolayı, plastik rötre çatlaklarını büyük ölçüde arttırmıştır (Bayasi 2002).

Şekil 2.9'da plastik rötre çatlaklarıyla ilgili Bayasi (2002) tarafından yapılan çalışma görülmektedir. Lif kullanılmayan karışımlarda %10 silis dumanı kullanımı kontrol karışımına kıyasla yaklaşık 2 kat daha fazla çatlak alanı oluşumuna sebebiyet vermiştir. Lif oranının %0,1 olduğu karışımlarda da benzer etki görülmüştür.



**Şekil 2.9.** Silis dumanı miktarı ve lif oranının plastik rötre çatlak alanına etkisi (Bayasi 2002)

Bloom tarafından yapılan benzer bir çalışma, üç farklı su/(çimento+silis dumanı) oranı için silis dumanının plastik rötre 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 (1996) tarafından yapılan benzer bir çalışmada, kuruma rötresinin azaltılması için betona eklenmesi gereken silis dumanı miktarının çimento ağırlığının %5-%10'u kadar olması gerektiğini ifade etmiştir.

## ***Uçucu Kül***

Uçucu kül, termik santrallerde kömürün yanması ile çok ince toz halinde elde edilen bir endüstriyel atık malzeme olup baca gazlarından elektrostatik tutucular vasıtasıyla yakalanır. ASTM C 618, bileşimlerine ve elde edildikleri kömür tipine göre uçucu külleri C sınıfı ve F sınıfı diye iki sınıfa ayırır. C sınıfı uçucu küller içerdikleri yüksek oranda kalsiyum oksit (CaO) nedeniyle hem puzolanik hem de çimentomsu karakter gösterirken, F sınıfı uçucu küller içerdikleri yüksek oranda silisyum oksit (SiO<sub>2</sub>) nedeniyle daha az bağlayıcılık özelliği göstermektedir. Kimyasal bileşimleri ve sahip oldukları bileşikler itibarıyla uçucu kül ile çimento birbirine çok benzerler. Hızlı soğuma ile oluşan uçucu kül amorf (camsı) yapı gösterirken, daha yavaş soğuma sonucu oluşan çimento kristal yapı gösterir. İki arasında temel fark, içerdikleri bileşiklerin bağıl miktarları arasındaki farktır. Çimento, kireç (CaO) bakımından zengin iken uçucu kül zayıftır. Uçucu kül yüksek oranda reaktif silis içerirken, çimentoda bu oran düşüktür. Uçucu kül tanelerinin çapı 1 mikron ile 100 mikron arasında değişir. Uçucu külün tane dağılımı, morfolojisi ve yüzey karakteristikleri betonun işlenebilirliği, su ihtiyacı ve dayanım gelişimi üzerindeki önemli etkinliği nedeniyle betonun performansı ve rötresi açısından dikkat çekici faktörlerdir (Mehta 1986).

Uçucu küller, betonun su ihtiyacını azaltması, yuvarlak taneli olması nedeniyle işlenebilirliğini arttırması ve dayanımını zamanla arttırması gibi olumlu etkilere sahiptirler. Su ihtiyacını azalttıkları ve kimyasal genleşmeleri sayesinde rötreyi de azaltırlar (Mehta 1986).

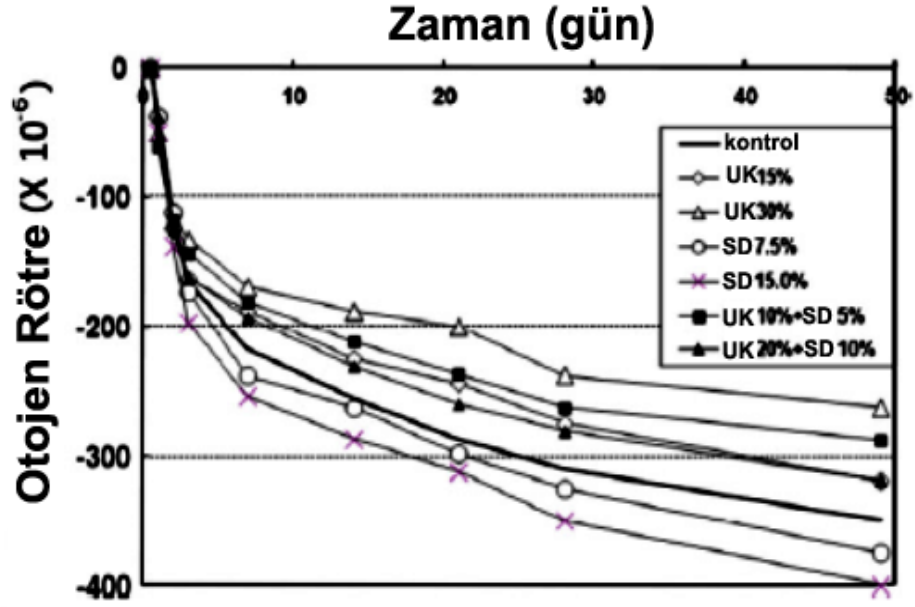
Wang ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan bir çalışmada, uçucu küllerin plastik rötreye çatlağına etkisi incelenmiştir. Uçucu kül oranı arttıkça plastik rötreye çatlaklarının giderek azaldığı ve F sınıfı uçucu külün, C sınıfı uçucu küle göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Uçucu kül kullanımından dolayı otojen rötreye erken yaşlarda normal çimentoya göre az olmakla birlikte ileriki yaşlarda daha büyük olmaktadır (Varga ve ark. 2012). Fakat Li

ve ark. (2012) ve Yoo ve arkadaşlarının (2012) yaptığı çalışmalarda ise uçucu kül kullanımı ve kullanım oranının artması otojen rötreyi azalttığı belirtilmiştir. Bu olayın muhtemel nedenini ise karışımdaki çimento oranının azlığı olarak ya da puzolanik reaksiyonların sonradan gerçekleşmesi sebebiyle kendiliğinden kurumunun daha az miktarda meydana gelmesiyle açıklamışlardır (Nawa ve Horita 2004, Yoo ve ark. 2012).

Termkhajornkit ve arkadaşlarının (2005) yaptığı diğer bir çalışmada ise, %25 uçucu kül kullanımı otojen rötreyi artırdığı fakat %50 uçucu kül kullanımı otojen rötreyi azalttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin uçucu küllü çimentolardaki etrenjit miktarından kaynaklandığı belirtilmiştir. Chan ve arkadaşlarının (1998) yaptığı çalışmada, uçucu küllü betonlar ve normal Portland çimentolu betonlar üretilmiş ve otojen rötresi karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan uçucu kül F sınıfı ve incelik modülü düşüktür. Deney sonuçlarına göre, uçucu kül içeren beton karışımlarının otojen rötresi daha düşük tespit edilmiştir (Chan 1998).

Şekil 2.10'da Yoo ve arkadaşları (2012) tarafından, uçucu külün otojen rötreye üzerindeki etkisiyle alakalı yapılan çalışma gösterilmektedir. Çalışma kapsamında, kontrol karışımına ilaveten, farklı oranlarda uçucu kül ve silis dumanı içeren, 6 karışım daha hazırlanmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi, silis dumanı otojen rötreyi olumsuz etkilerken, uçucu kül kullanımı olumlu etki yaratmıştır. Söz konusu bu olumlu etkide, uçucu külün kimyasal birleşimi, reaktivitesi ve inceliği önem arz etmektedir (Polat 2013).



Şekil 2.10. Uçucu külün otojen rötire üzerindeki etkisi (Yoo ve ark. 2012)

Uçucu kül kullanımının kuruma rötresine etkisini araştıran başka bir çalışmada ise kontrol karışımına ilaveten farklı oranlarda uçucu kül içeren 3 karışım daha hazırlanmıştır. Üretilen numunelerin 21 ° C ve 32 ° C derecede 180 güne dek kuruma rötresi davranışı incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, karışımlarda uçucu kül oranı arttıkça kuruma rötresi de artmıştır (Ravina 1998).

### ***Yüksek Fırın Cürufu***

Yüksek fırın cürufu; esas itibariyle silis, kalsiyum aluminosilis ve bazik esaslı bileşikler içeren ve yüksek fırınlarda demir üretimi sırasında ergimiş halde elde edilen bir atık üründür. Yüksek fırın cüruflarının kimyasal bileşimleri ve özellikleri elde edildikleri ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak farklılık gösterirler. İşlevsellikleri itibariyle Tip G ve Tip H olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Tip G cürufu; ergimiş yüksek fırın cürufunun hava veya az miktarda su ile soğutularak çok ince taneler haline getirilen camsı yapıda, puzolanik özelliği çok zayıf bir üründür. Tip H cürufu; sıvı haldeki yüksek fırın cürufunun su ile doyurularak ya da su ve hava ile birlikte söndürülerek ve çok ince toz halinde öğütülen puzolanik özelliği nispeten yüksek bir üründür. Tip H cürufunda camsı madde oranı daha yüksek olup çok hızlı soğutulması

nedeniyle sahip olduğu düzensiz yapısı gereği daha reaktiftir ve bundan dolayı beton üretiminde kullanımları daha yaygındır. Kalsiyum içeriklerine ilave olarak, tane boyutu ve karakteristikleri ile camsı madde bileşimi ve oranı, yüksek fırın cürüflarının aktivitelerinde etkin olan temel faktörlerdir. Tane boyutu küçüldükçe, betonun erken dayanım gelişimine sağladıkları katkı artar. Tane boyutu 45 µm'den daha büyük olan cüruf taneciklerinin hidrasyonu zorlaştığı için betonun dayanım gelişimine katkı sağlamaları doğal olarak mümkün olmaz (Mehta 1986).

Bilindiği üzere, yüksek fırın cürufu çimento yerine kullanılan bir mineral katkı çeşididir. Aksini iddia eden az sayıda araştırma olsa da genel kanı cüruf kullanılması durumunda ve kullanım oranlarının artırılması durumunda rötrenin arttığıdır. Aktive edilen cüruf çimentosu normal Portland çimentosundan daha fazla rötreye göstermektedir (Tazawa ve Miyazawa 1995, Lura 2001, Nawa ve Horita 2004, Neto 2008, Ekaputri 2011).

Farklı s/b oranları ile yapılan çalışmalarda (s/b: 0,27-0,42), cüruf kullanımından dolayı otojen rötreye artmaktadır. Bu artışın nedeni ise daha fazla kimyasal rötreye oluşturmaları, kimyasal rötreden ve inceliğinden dolayı ince boşluk yapısı oluşturmaları ve cürufun tane şekillerinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Polat 2013).

Yüksek fırın cürufu içeren yüksek dayanımlı betonlar önemli ölçüde otojen rötreye gösterirler ve dayanımı ileri yaşlarda arttırdığı için, bu yüzden yüksek oranlarda kullanıldıklarında çatlaklara sebebiyet verebilecekleri belirtmişlerdir (Min ve ark. 2010). Bazı çalışmalarda (Lura 2003), yüksek fırın cürufu kullanımı otojen rötreyi azalttığı belirtilmiştir.

### **2.3.5 Bazı Kimyasal Katkıların Kullanımının Etkisi**

Teknoloji ve bilimdeki gelişmeler, beton teknolojisine de yansiyarak kimyasal katkıları betonun beşinci bileşeni durumuna getirmiştir. Beton katkı maddeleri, betonun bazı özelliklerini değiştirerek performansını artırabilmek ve/veya betonun daha ekonomik olmasını sağlayabilmek için kullanılmaktadır. Taze betonun işlenebilirliğini artırmak,

priz sürelerini değiştirmek, sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığını arttırmak gibi amaçlarla beton üretiminde kimyasal katkı kullanılmaktadır. Beton teknolojisinde kimyasal katkı maddeleri, su içerisinde erime özelliği bulunan katkı maddeleri olarak tanımlanmaktadır. Betonun karışım suyunu azaltan katkılar, taze betonun priz almasını geciktiren veya hızlandıran katkılar, kimyasal katkı maddeleri olarak anılan katkı grubu içerisinde yer alan maddelerdir (Erdoğan 2003, Topçu 1998).

Söz konusu bu kimyasal katkı gruplarının rötreye farklı etkileri bulunmaktadır. Çizelge 2.3'te beton üretiminde kullanılan bazı kimyasal katkı maddelerinin kuruma rötresine etkisi gösterilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi, su azaltıcı katkılar her ne kadar kimyasal yapıları itibariyle rötreyi arttırmaya meyilli olsa da su ihtiyacını azalttığından ötürü rötreyi de azaltmış olur. Hatta çizelgedeki en olumlu etki yüksek oran su azaltıcı katkıya ait olmuştur. Dikkat çeken diğer bir husus ise, kontrol karışımına kıyasla %5 su ihtiyacını azaltan, priz hızlandırıcı ve priz geciktirici 2 tip su azaltıcı katkıdan priz geciktirici olanı kuruma rötresine daha fazla olumlu etki yapmışır. Zaten priz geciktirici katkının priz hızlandırıcı katkıya nazaran daha az rötreye yaptığı yine çizelgeden görülmektedir.



**Çizelge 2.3.** Kuruma rötresine bazı katkı maddelerinin etkileri (Bissonnette 1996)

<b>Katkı Maddesi</b>	<b>Su Azaltma Oranı (%)</b>	<b>Su muhtevası</b>	<b>Kuruma Rötresi (mikrostrain)</b>
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

Yine Bissonnette (1996) tarafından yapılan çalışmalarda, bazı kimyasal katkı maddelerinin rötreye etkileri hakkında, Çizelge 2.3'ten de anlaşılacağı şekilde, çeşitli deneysel sonuçlar bulunmuştur.

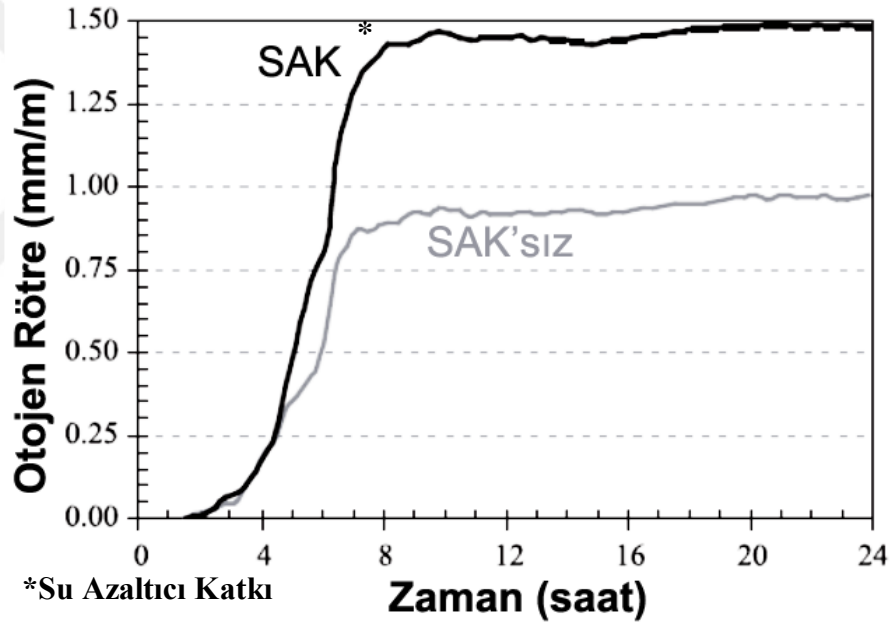
Su/çimento oranını düşüren su azaltıcı katkı maddeleri kimyasal yapısı tri-etanolamine içerdiği için söz konusu bu katkılar rötreyi arttırma eğilimindedirler. Fakat su ihtiyacını azalttığı için rötreye de azalmış olur (Bissonnette 1996).

Son yıllarda kullanılmaya başlanan yüksek oran su azaltıcı katkı maddeleri ise, 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

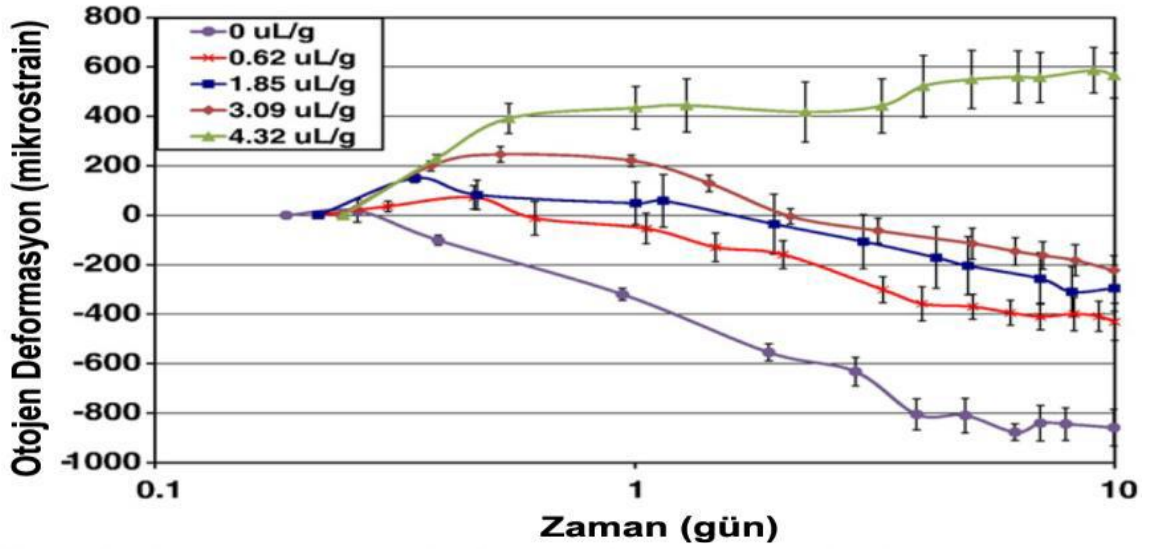
geciktirdikleri için düşük hidratasyon ısısı sayesinde beton içerisindeki su, betonu çabuk terk etmeyecektir ve böylece rötre de azalacaktır. (Bissonnette 1996)

Yüksek oran su azaltıcı katkı, tane yüzeylerini kaplayarak çimentonun hidratasyonunu geciktirdiği için, otojen rötrenin meydana gelmesinde bir gecikme meydana gelmektedir (Termkhajornkit 2005, Pekmezci 2006). Bu da söz konusu katkının  $C_3S$ 'in hidratasyonunu geciktirmesinden kaynaklanmaktadır.  $C_3S$ 'in hidratasyonu geciktiği için otojen rötrenin gelişme periyodunun başlangıcı da uzamaktadır (Tazawa ve Miyazawa 1995, Nawa ve Horita 2004, Pekmezci 2006). Benzer sonuçlar, Şekil 2.11'de Holt (2005) tarafından yapılan ve Şekil 2.12'de Mohr ve Hood (2010) tarafından yapılan çalışmalarda da görülmektedir.



Şekil 2.11. Su azaltıcı katkının otojen rötre üzerindeki etkisi (Holt 2005)

Şekil 2.11'de yüksek dayanımlı betonların mekanik ve kimyasal özellikleri üzerinde su azaltıcı katkının etkisini araştırdıkları çalışmalarında, Holt (2005), söz konusu katkının farklı oranlarda (%0,5, %1 ve %1,5) kullanımıyla üretilen beton karışımlarında, katkı oranları arttıkça rötre miktarının arttığını ifade etmiştir (Holt 2005).



**Şekil 2.12.** Farklı oranlarda su azaltıcı katkı içeren çimento hamurlarının otojen rötresi (Mohr ve Hood 2010)

Şekil 2.12’de gösterilen, Mohr ve Hood (2010) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, 0,30 s/b oranında üretilen numunelerin otojen rötresi üzerinde su azaltıcı katkı kullanımının etkileri araştırılmıştır. Söz konusu katkının kullanıldığı betonlarda otojen rötrenin, kullanım yüzdesinin artmasıyla kontrol numunelerine kıyasla azalmakta olduğu tespit edilmiştir (Mohr ve Hood 2010).

Türkmenoğlu (2015) tarafından yapılan çalışmalarda, priz geciktirici katkı terleme sürecini uzatarak tüm deney süresi boyunca numune yüzeyinin nemini muhafaza etmiştir. Böylelikle, kapiler basınç yavaşça azalmıştır ve 6 saat boyunca plastik rötre çatlağı oluşmamıştır.

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

Yine Türkmenoğlu (2015) tarafından plastik rötre oluşumuna ilişkin yapılan bir çalışmada, priz hızlandırıcı katkı terlemenin azalmasını sağlayarak çökelmenin erken

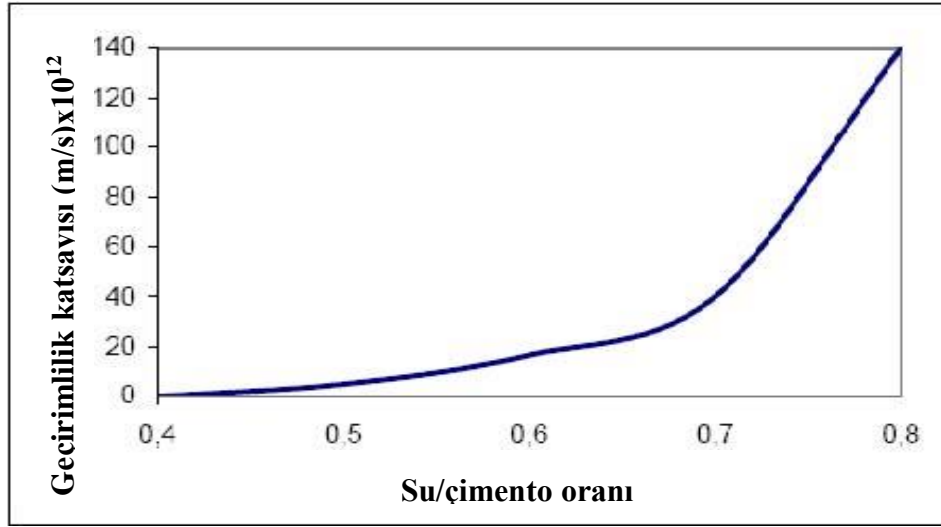
bitmesine ve böylelikle kapiler basıncın da daha erken düşmesine sebep olmuş ve plastik rötreye sebebiyet verip erken çatlak gelişimine neden olmuştur.

Hava sürükleyici katkı maddelerinin rötreye üzerinde 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).

### **2.3.6. Betonun Boşluk Yapısının Etkisi**

Betonun durabilitesi, boşluk miktarı ve yapısı ile yakından ilgilidir. Boşluk miktarı ve boşlukların birbiri ile olan bağlantıları arttıkça zararlı malzemelerin ve suyun beton içine girmesi ve taşınımı kolaylaşır. Bunun sonucu olarak beton daha kolay hasar görür. Betonun durabilitesinin artırılarak daha uzun servis ömürlerine sahip yapılar elde etmek için öncelikle betonun boşluk miktarının azaltılması gerekir. Aynı zamanda, boşluk miktarı azalan betonda, suyun beton bünyesinden uzaklaşması daha zorlaşacak ve kuruma rötresi ve plastik rötreye de azalacaktır (Kadıoğlu 2006).

Boşluklu ve heterojen bir iç yapıya sahip olan beton; çimento hamuru, agrega ve agrega-çimento hamuru ara yüzeyinden (ITZ) oluşan bir kompozit kabul edilebilir. Bu üç fazın her biri boşluk içermektedir. Çimento hamuru genel olarak %30-40 kapiler poroziteye sahiptir. Şekil 2.13'te su/çimento oranının beton geçirimsizliğine etkisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, hidratasyonu tamamlanmış 0,7 su/çimento oranına sahip çimento hamurunun geçirimsizlik katsayısı yaklaşık  $6 \times 10^{-11}$  cm/sn'dir (Uyan 1977).



Şekil 2.13. Su/çimento oranının beton geçirimsizliğine etkisi (Uyan 1977)

Agregalar genellikle %1-3 gibi düşük poroziteye sahiptirler ve nadiren %8-10 'u aşarlar. Her ne kadar ITZ bölgesinin geçirimsizliği ölçülmemişse de bu bölgenin oldukça boşluklu olduğu bilinir. Kuruma rötresi sırasında çimento hamuru büzülme isterken agregalar rijit elemanlar olarak buna engel olurlar ve bu da çimento hamuru agrega yüzeyi arasında mikro çatlaklara neden olur. Yine plastik rötreye olayında, terleme suyunun agrega yüzeylerine takılarak bu bölgelerde büyük boşluklar oluşturduğu da bilinmektedir (Baradan 2010).

Bir hamurun porozitesi, genellikle kür süresindeki artış ve su/çimento oranındaki azalmayla birlikte azalır. Bu durum çimentodaki C<sub>2</sub>S ve C<sub>3</sub>S'in oluşturduğu C-S-H jelinin hidrasyon sırasında kılcal boşlukları doldurmasına bağlıdır. Çimentoya katılacak uçucu kül, cüruf ve silis dumanı, hidrasyon 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).

Bilindiği gibi, otojen rötreye beton geçirimsizliği azaltıkça artmaktadır. Diğer yandan, plastik ve kuruma rötresi beton bünyesindeki suyun difüzyonuyla orantılıdır. Yani geçirimsizlik arttıkça, söz konusu rötrelere de artmaktadır.

### 2.3.7. Ortam Sıcaklığının Etkisi

Ortam sıcaklığı, betonun kalitesini ve performans beklenen özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Ortam sıcaklığının yüksek olması, betonun rötre eğilimini arttırabilir ve betonu çatlak riskine maruz bırakabilir. Bu sorunlar, hidrasyon hızının ve taze beton içindeki suyun buharlaşma hızının artmasından kaynaklıdır (Soroka 1993).

Bilindiği gibi, ortam sıcaklığı arttıkça;

Beton sıcaklığı yükselir,  
Su ihtiyacı artar,  
Kıvam kaybı artar,  
Priz süresi kısalır.

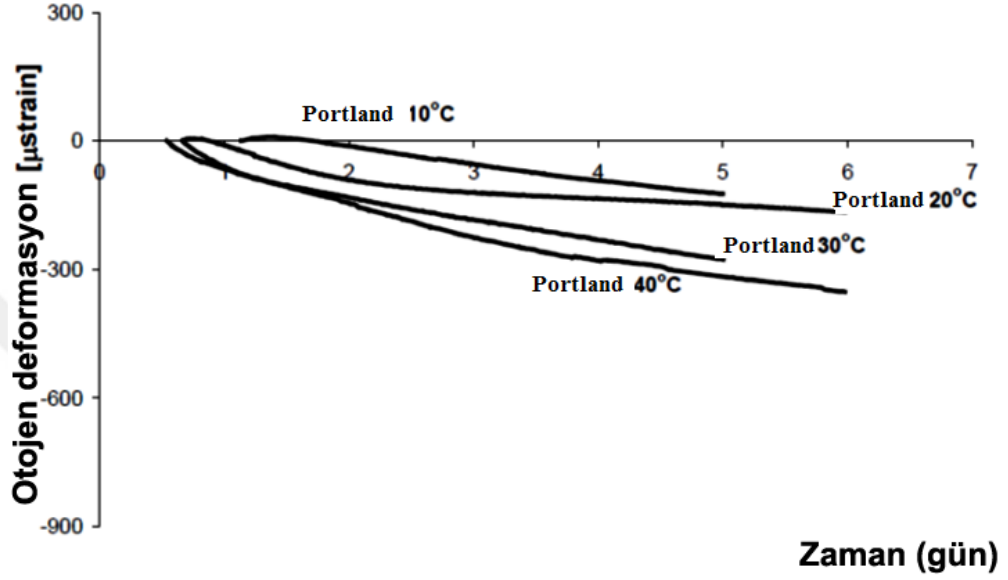
Daha önce de ifade edildiği gibi, buharlaşma hızı ile terleme hızının dengede olması ideal bir durumdur. Ancak, buharlaşma hızının terleme hızından daha yüksek olması durumunda beton yüzeyinde plastik rötre meydana gelir.

Aynı şekilde, ortam sıcaklığının yüksek olması çeşitli sebepler sonucu beton bünyesinden suyun uzaklaşma miktarını arttırarak kuruma rötresinin de artmasına neden olur (Engin 2015).

Otojen rötrenin sıcaklıktan nasıl etkilendiği konusunda yapılan çalışmaların sonucunda ise, sıcaklığın artmasıyla otojen rötrenin arttığı tespit edilmiştir (Lura 2001, 2003, Akçay 2007). Ekzotermik olan çimentonun hidrasyon hızı sıcaklık artışıyla artmaktadır (Jensen ve Hansen, 1999). Farklı çimento tipleri ile yapılan çalışmalarda da, otojen rötrenin yüksek sıcaklıkta arttığı ifade edilmiştir (Lura 2003). Düşük sıcaklıkların otojen rötrede ters etki yaptığı belirtilmiştir (Kamen 2008).

Farklı sıcaklıklarda kür edilmiş Portland çimentosu hamurunun otojen rötre davranışı Lura (2003) tarafından incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.14'te görülmektedir.

Şekilden de görüldüğü gibi, deneylerde kullanılan tek tip çimento türünün sıcaklığının artmasıyla, otojen rötre deformasyonu da artmıştır. 40° C derecede, otojen rötrenin 400 mikrostrain miktarlarına geldiği şekilden de anlaşılmaktadır.



Şekil 2.14. Farklı sıcaklıklarda kür edilen Portland çimentosu hamurunun otojen deformasyonu (Lura 2003)

### 2.3.8. Bağlı Nem Etkisi

Bağlı nem etkisi, betonun rötresini farklı şekillerde etkileyen fakat diğer parametrelerin aksine değiştiremeyen bir unsurdur. Bağlı nem oranının düşük olması, sertleşmiş betondaki su kaybını ve dolayısı ile rötrenin meydana gelmesine neden olmaktadır. Kuru ortam devam ettikçe, betonun su kaybı daha hızlı olmakta ve rötre miktarı artmaktadır. Sonuç olarak, bağlı nemin azalması beton bünyesinden uzaklaşacak su miktarını arttırarak, betonun rötresini arttıracaktır (Tepe 2006).

Yapılan çalışmalara göre, bağlı nem oranı düştükçe rötrenin azaldığı bilinmektedir. Neville (2000) yaptığı çalışmalarda, bağlı nemin %94'ten az olması durumunda rötrenin başladığını, ayrıca, bağlı nemin %100 olması durumunda ise negatif rötre gerçekleştiğini ifade etmiştir.

Erdoğan (2003) yaptığı çalışmalarda, bağıl nemin %50 olması durumunda karbonatlaşma rötresinin maksimum olduğunu tespit etmiştir. Bağıl nem %25 ve %100 arasında iken betonda karbonatlaşma rötresi olmamaktadır. Bunun sebebi ise, bağıl nemin %100 olması durumunda, çimento hamurundaki gözeneklerin suyla dolarak beton bünyesinde karbonatlaşma rötresine neden olacak karbon dioksitin içeri girmesini engellemesinden kaynaklanmaktadır. Bağıl nemin %25 olması durumunda betonda karbonatlaşma rötresinin oluşmaması ise, çimento hamurunda söz konusu rötreye neden olacak miktarda su bulunmaması olarak açıklanmıştır.

## **2.4. Rötreye Azaltıcı Katkı (SRA)**

### **2.4.1. Kimyasal Yapısı**

Dünyadaki ilk rötreye azaltıcı katkı maddesi, özel bir şirket ortaklığında, 1982 yılında Japonya'da geliştirilmiş ve 1985 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde patenti alınmıştır. Daha sonraları, söz konusu bu katkı maddelerine olan ilgi gün geçtikçe artmıştır. Düşük viskoziteye sahip olup, suda çözünebilen bu katkıları, kimyasal olarak iki grup halinde mevcuttur. Söz konusu bu gruplar, Neopentil-glycol  $[(CH_2)_2 - C - (CH_2-OH)_2]$  veya propylen-glycol'dur  $[(CH_3 - CH_2 - CH - (CH_2 - OH)_2]$  (Nmai 1998).

### **2.4.2. Çalışma Mekanizması**

Beton bünyesindeki suyun betondan uzaklaşması 3 aşama şeklinde olur. Öncelikle, hidrate olmuş çimento hamurundaki adsorbe su kaybına bağlı hacimsel küçülme oluşur. İkincil olarak, kapiler gerilmeler sonucu betondan uzaklaşan su ve son olarak C-S-H hidratasyon ürünlerinin birbirlerine yaklaşarak Van der Waals bağları etkisiyle oluşan hacimsel küçülme olarak sonuçlanır (D'Souza 2005).

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 korunarak rötreye miktarını azaltmış olur.



Rötre azaltıcı katkı maddelerinin kapiler gerilmeleri azaltma yöntemiyle çalıştığı yine Sato (1983) ve Goto ve arkadaşlarının (1985) yaptığı çalışmalarda vurgulanmıştır.

### **2.4.3. Buharlaşmaya Etkisi**

SRA'nın suyun buharlaşma hızına bir etkisi yoktur. Yapılan bazı deneylerde, SRA kullanılmış ve kullanılmamış 2 farklı 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. (Weiss 2005, Kadioğlu 2006)

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

### **2.4.4. Diğer Katkılarla Uyumluluk ve Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi**

Rötre azaltıcı katkı maddeleri, günümüzde kullanılan tüm hava sürükleyici katkı maddeleri, orta düzey su azaltıcılar, süper akışkanlaştırıcılar, priz geciktiriciler, priz hızlandırıcılar, silis dumanı gibi mineral katkıları ve korozyon inhibitörü katkılarıyla uyumludur. Dikkat edilmesi gereken husus, diğer katkı maddeleriyle karıştırılmadan karışımlara ilave edilmesidir (Kadioğlu 2006).

Rötre azaltıcı katkı maddelerinin, suyun yüzey gerilimini düşürmesiyle, menisk formunun konsolide etkisinde bir azalma olmuştur. Buna bağlı olarak, betonun mekanik özelliklerini kazanma süresi de uzayacaktır. (Weiss 2005).

Bilindiği gibi, rötre azaltıcı katkı maddelerinin bir diğer etkisi ise, priz geciktirici etki göstererek, betonun özellikle erken yaş dayanımını olumsuz etkilemesidir. Söz konusu katkı, betonun nihai dayanımında %0 ile %15 oranında bir azalmaya neden olabilir.

Bu tez kapsamında, farklı fabrika ürünleri olan rötre azaltıcı katkıların ve tek tip

polipropilen lif (PF) kullanımının çimentolu sistemlerin taze hal ve bazı sertleşmiş hal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma 3 farklı aşamadan oluşmuştur. Birinci aşamada, rötre azaltıcı katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten, farklı rötre azaltıcı katkıları kullanılarak 9 adet hamur ve harç karışımları üretilmiştir. Üretilen karışımlardan, taze ve sertleşmiş hal özellikleri açısından kontrol karışımına kıyasla en üstün performans gösteren rötre azaltıcı katkı tespiti yapılmıştır. Harç karışımlarının kuruma rötresi mikroskobik analizlerle desteklenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, birinci aşamada en başarılı olarak tespit edilen SRA kullanılarak beton karışımları üretilmiştir. Üretilen beton karışımlarının taze ve sertleşmiş hal özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında ise, tek tip PF kullanımının beton karışımlarının taze ve sertleşmiş hal üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, söz konusu beton özellikleri açısından en başarılı olarak seçilen SRA ve PF kıyaslanmıştır. Bunlara ilaveten, üretilen karışımların maliyet analizi de gerçekleştirilmiştir.

### 3. KONU İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, rötre azaltıcı katkı (SRA) ve lif üzerine yapılmış çalışmaların kısa özetleri verilmiştir.

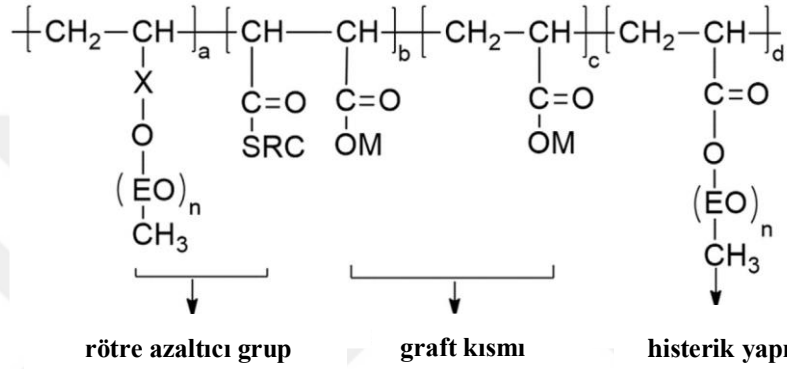
Çizelge 3.1’de Kadioğlu (2006) tarafından yapılan bir çalışmaya ait sonuçlar gösterilmektedir. Kadioğlu, SRA’nın beton karışımlarının elastisite modülüne etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, 2 farklı su/çimento oranına sahip beton karışımları hazırlamıştır. Çizelgeden de görülen sonuçlara göre, SRA kullanımıyla beton karışımlarının basınç dayanımları az miktarda olumsuz etkilenirken elastisite modülü ciddi mertebede etkilememiştir.

**Çizelge 3.1:** Üretilen beton karışımlarının bazı özellikleri (Kadioğlu 2006)

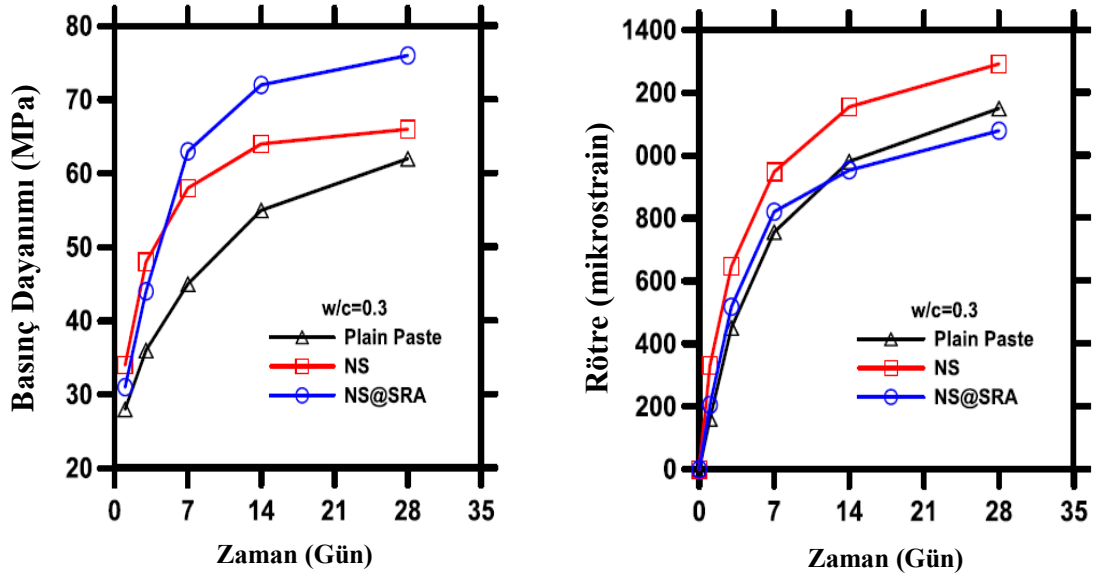
Numune Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Kontrol s/ç=0,33	90	44.6
Kontrol s/ç=0,53	51	37.6
SRA-1 s/ç=0,33	68	42.8
SRA-1 s/ç=0,53	44	33.9
SRA-2 s/ç=0,33	77	43.5
SRA-2 s/ç=0,53	47	36

Gu ve arkadaşları (2017) yaptığı bir çalışmada, NanoSiO<sub>2</sub> ‘in (NS) çimento hamurundaki dağılımını geliştirmek amacıyla NS yüzeyine SRA graft edilerek yeni bir çekirdek-kabuk parçaçığı (NS+SRA) sentezlemiştir. Şekil 3.1.’de NanoSiO<sub>2</sub> ve SRA’nın sentezi gösterilmektedir. Şekil 3.2’de ise, üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanımları ve rötre değerleri gösterilmektedir. Yazarlar, bu yeni sentezin çimento hamurunun

rötresine ve basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, NS, SRA ve NS+SRA katkısı içeren 3 farklı seri karışım hazırlamışlardır. Deney sonuçlarına göre NS+SRA kullanımı karışımların özellikle ileri yaşlardaki dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Çimento hamurunun otojen rötresini önemli ölçüde arttıran geleneksel NS'den farklı olarak NS+SRA katkısı çimento hamurunun otojen rötresini belirgin bir şekilde etkilemediği yazarlar tarafından beyan edilmiştir.



Şekil 3.1: Rötre Azaltıcı Katkı ve NanoSiO<sub>2</sub> Sentezi (Gu 2017)

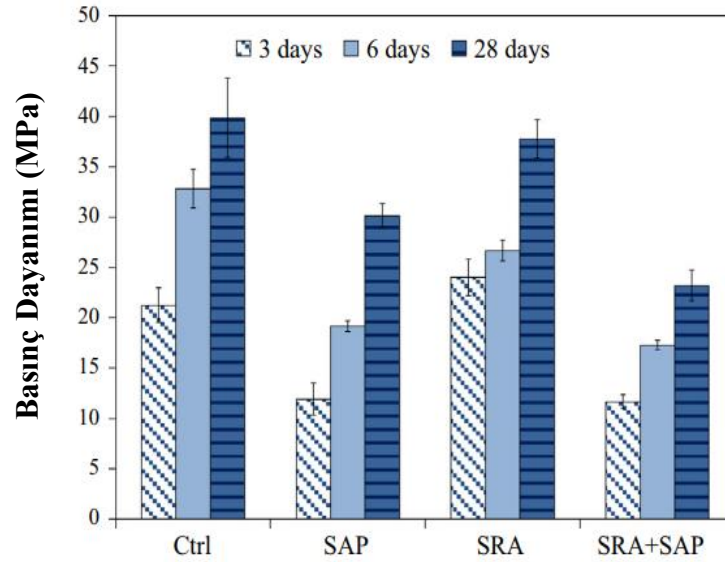


Şekil 3.2: Numunelerin 28 Günlük Basınç Dayanımı ve Rötre Değerleri (Gu 2017)

Diğer bir çalışmada Bloom ve Bentur (1992) yüksek ve normal dayanımlı beton karışımlarında büzülme davranışını incelemiştir. Bu amaçla düşük ve yüksek

su/çimento oranına sahip 2 seri beton karışımı hazırlamıştır. Yazarlar, beton karışımının dayanımı arttıkça betonda oluşan içsel gerilme miktarının arttığını iddia etmiştir.

Wehbe ve Ghahremaninezhad (2017) yaptığı bir çalışmada, süper emici polimerlerin (SAP) ve SRA'ların çimentolu sistemlerin otojen rötresine ve mikro yapısına etkisini incelemiştir. Şekil 3.3'te üretilen numunelerin basınç dayanımları görülmektedir. Deneysel sonuçlarına göre çimento hamurunda SRA kullanımının SAP emilimini azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca SRA ve SAP'lerin birlikte kullanıldığı çimento hamuru karışımlarının sadece SAP içeren hamur karışımlarına göre özellikle erken yaşlarda daha fazla büzülme sergilediği belirtilmiştir.



Şekil 3.3: Numunelerin çeşitli zamanlardaki basınç dayanımı (Wehbe 2017)

Lopez (2004) yaptığı çalışmalarda, yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı hafif betonların sünme ve rötresini araştırmıştır. Hafif betonun sünmesinin normal betona göre daha az ve rötresinin ise daha fazla olduğu sonucuna varmıştır.

Zuo ve arkadaşları (2017) yaptığı bir çalışmada su azaltıcı fonksiyonu olan yeni bir polimer tipi SRA'nın çalışma mekanizmasını araştırmıştır. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla geleneksel SRA ve yeni nesil polimer tipli SRA içeren karışımlar hazırlamıştır. Deneysel sonuçlarına göre, erken yaşlarda genleşme periyoduna sahip olan poli-ether tipi geleneksel SRA içeren karışımların aksine polimer tipi SRA içeren karışımlarda daha

yavaş ve monoton bir büzülme gelişimi gözlemlendiği ifade edilmiştir.

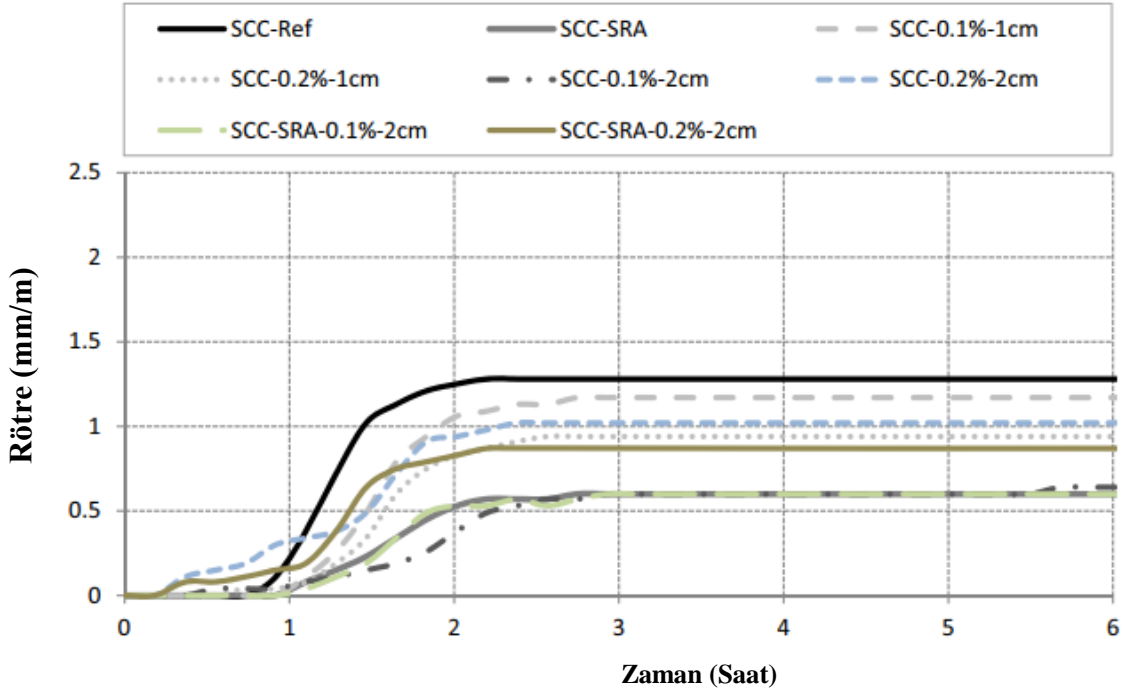
Folliard ve Berke (1997) ile Ruacho ve arkadaşları (2009) tarafından yapılan çalışmalarda, SRA kullanımının hem normal hem de yüksek dayanımlı betonların geirirnililiği ve çatlak oluşumu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmalarda söz konusu katkı oranı bağlayıcı ağırlılığının %1,5'i olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre SRA kullanımının geirirnililiği azalttığı ve çatlak oluşumunu engellediği tespit edilmiştir.

Deboodt ve arkadaşları (2016) yaptığı bir çalışmada, harç karışımlarının otojen rötresini ve beton prizmaların kuruma rötresi davranışını incelemiştir. Tüm karışımlarda ince hafif agrega kullanılmıştır. Kontrol karışımına ilaveten, agreganın nem durumu ve SRA kullanımına bağlı olarak 3 farklı seri karışım hazırlamıştır. 1. seride, ince hafif agregalar önceden ıslatılarak kullanılmıştır. 2. seride, SRA karışıma ilave edilmiştir. 3. seride ise SRA ve önceden ıslatılmış ince hafif agrega kombinasyonu olan karışım üretilmiştir. Deney sonuçlarına göre, SRA ve önceden ıslatılmış ince hafif agreganın kombinasyonu olan karışımın otojen rötreyi azaltmada en etkili karışım olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca söz konusu karışımın kontrol karışımına kıyasla %84 daha az büzülme davranışı gösterdiği tespit edilmiştir.

Rongbing ve Jian (2005) ile Quangphu ve arkadaşları (2008) tarafından yapılan çalışmalarda, farklı oranlarda SRA kullanılarak üretilen betonların kuruma rötresi davranışları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. SRA kullanım oranı arttıķa betonların çatlama miktarlarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca söz konusu katkı kullanımı betonların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir ve katkı kullanım oranı artışı ile birlikte betonların mekanik özelliklerinin zayıfladığı belirlenmiştir.

Tioua ve arkadaşları (2017) yaptığı bir çalışmada, hurma ağacı lifi (HAL) ve SRA kullanımının kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımlarında nihai ve erken yaş büzülme davranışına etkisini incelemiştir. Bu amaçla 1 ve 2 cm uzunluğunda toplam hacmin %0,1 ve %0,2'si HAL ve imento ağırlılığının %2'si oranında SRA kullanılarak 14 farklı KYB karışımı hazırlamıştır. Şekil 3.4'te ilgili numunelerin rötre değerleri görülmektedir. Deney sonuçlarına göre, HAL'nin kuru-ıslak çevrimlerine maruz kalan KYB karışımlarının büzülme davranışına SRA'ya benzer etki göstermiştir. Yazarlar,

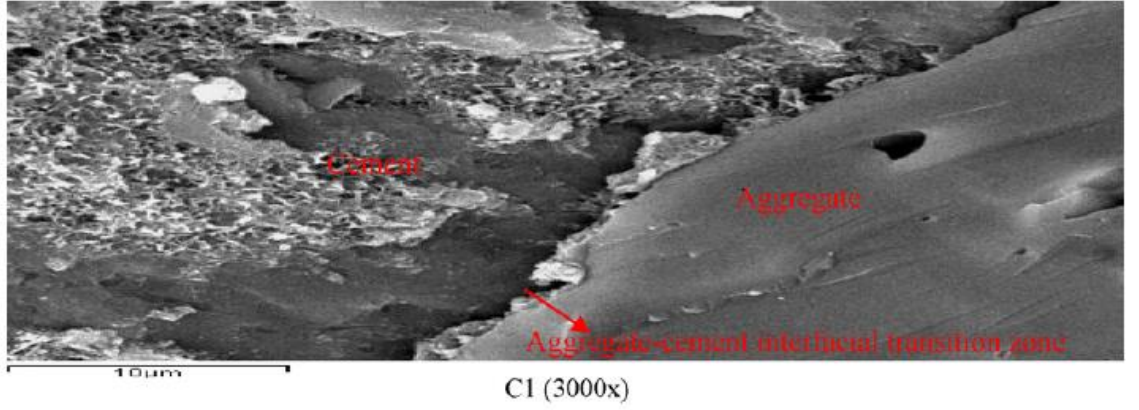
HAL'nin KYB karışımlarının erken yaş kuruma rötresini ve çatlama riskini azalttığından kaynaklandığını öne sürmüştür.



Şekil 3.4: Kendiliğinden Yerleşen Beton Numunelerinin Rötre Değerleri (Tioua 2017)

Polipropilen lif kullanımının beton karışımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi Sun ve Xu (2009) tarafından araştırılmıştır. Beton karışımlarının kristal yapısını ve agrega-hamur ara yüzeyini (ITZ) gözlemlemek amacıyla SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri sonucu elde edilen, ITZ'e ait görsel Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre lif kullanımı ile beton karışımlarının mikro boşluk miktarının, agrega-hamur ara yüzeyinin ise mikro çatlak boyutu ve miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

Lif kullanımı ile beton karışımlarının geçirgenlik özelliklerinin iyileştiği ancak aşınma direncinin azaldığı yazarlar tarafından beyan edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada hazırlanan beton karışımları için polipropilen lif optimum kullanım miktarının 0,9 kg/m<sup>3</sup> olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 3.5:** Agrega-hamur Arayüzeyi (ITZ) (Sun 2009)

Topçu ve Canbaz (2007) yaptığı bir çalışmada, liflerin betonların mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, 3 farklı oranda çelik ve polipropilen lif içeren beton karışımları hazırlamışlardır. Deney sonuçlarına göre, farklı oranlarda betona eklenen çelik ve polipropilen lifler betonun mekanik özelliklerini (özellikle eğilme dayanımını) önemli derecede arttırmış ancak işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir.

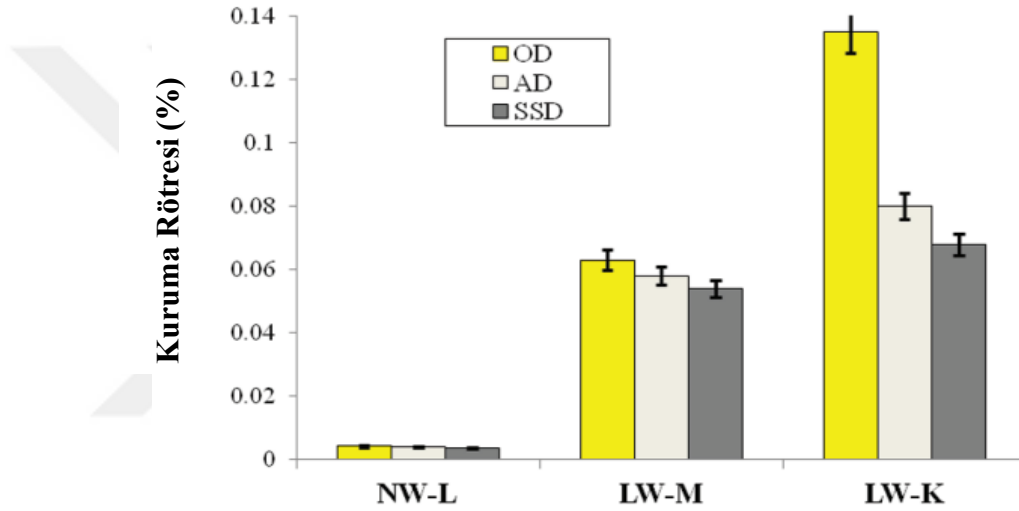
Türker (2000) yaptığı bir çalışmada, polipropilen lif ve çelik hasır kullanımının çekme çatlaklarına etkisini incelemiştir. Elde ettiği sonuçlara göre, çelik hasır kullanımıyla gerilme çatlaklarının %65'e kadar, polipropilen lif kullanımıyla %72'ye kadar azaldığı gözlemlenmiştir.

Aly ve arkadaşları (2008) yaptığı bir çalışmada, curüflu betonlarda erken yaş kısıtlanmış rötreyi araştırmıştır. Bu amaçla, polipropilen lifli ve lifsiz curüflu betonlar hazırlanmıştır. Polipropilen lifli betonlar daha yüksek büzülme ve elastisite modüllerine sahip olduğundan, lifsiz betonlara göre daha fazla çatlama eğilimi gösterdiği yazarlar tarafından beyan edilmiştir.

Hafif agrega nem durumunun beton karışımlarının kuruma rötresine etkisi Mardani-Aghabaglou ve arkadaşları (2015) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, tamamen kuru, hava kuru ve suya doymuş kuru yüzey olmak üzere 3 farklı nem durumuna sahip hafif pomza agregası kullanarak beton karışımları hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda çökme ve yayılma değeri sabit tutulmuştur.



Söz konusu beton numunelerinin kuruma rötresi değerleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, en düşük rötre değeri kuru doymun yüzey agregalara aittir. Yazarlar, agreganın kuru doymun yüzey kullanılması durumunda beton karışımlarının kuruma rötresinin azalmasına neden olduğunu ifade etmiştir. Söz konusu bu olumlu etkinin kuru doymun yüzey agregaların içsel kütleme görevi yaptığından dolayı oluştuğunu açıklamıştır. Benzer sonuçlar Aitcin (2004) tarafından da iddia edilmiştir.



Şekil 3.6: Beton numunelerinin kuruma rötresi değerleri (Mardani Aghabaglou, 2015)

Zhang (2005) yaptığı çalışmalarda, genişletilmiş kil agregası kullanılan bir tür hafif betonun kuru kür koşullarında ilk 6 aylık rötresinin normal betonunkinden daha az 1 yıllık rötresinin ise daha fazla olduğu sonucuna varmıştır.

Yoo ve arkadaşları (2017) yaptığı bir çalışmada, ard-germeli yüksek dayanımlı betonların çatlama potansiyelini SRA kullanarak azaltmayı hedeflemiştir. Bu amaçla, SRA içermeyen kontrol karışımına ilaveten çimento ağırlığının %1 ve %2'si oranında SRA kullanılarak farklı beton karışımları hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, ard-germeli yüksek dayanımlı betonlarda SRA kullanımı kontrol karışımına kıyasla 28 gün sonunda daha yüksek basınç ve çekme dayanımı, daha düşük büzülme gerilmesi ve gecikmiş büzülme çatlakları gösterdiği ifade edilmiştir. Yazarlar, ard-germeli yüksek dayanımlı betonlarda çalışma kapsamındaki özellikler açısından en uygun SRA kullanım

oranının %2 olduğunu iddia etmişlerdir.

Gagné (2016) diğer bir çalışmada, çimentolu sistemlerin otojen rötresini incelemiştir. Bu amaçla, ürettiği karışımlarda hamur fazı hacmini arttıran Cao bazlı genleştirici bir etken kullanmıştır. Yazarlar, söz konusu yöntemi kullanarak karışımlarda otojen rötrenin azaldığını beyan etmiştir.



## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1 Amaç ve Kapsam

Bu tez kapsamında, farklı fabrika ürünleri olan rötre azaltıcı katkıların (SRA) ve tek tip polipropilen lif (PF) kullanımının çimentolu sistemlerin taze hal ve bazı sertleşmiş hal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, 4 aşamalı bir deneysel çalışma planlanmıştır.

Birinci aşamada, rötre azaltıcı katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten, 4 farklı firmanın ticari ürünü olan 9 farklı rötre azaltıcı katkı kullanılarak toplamda 10 adet hamur ve harç karışımları üretilmiştir. Rötre azaltıcı ve süper akışkanlaştırıcı katkının uyumunu incelemek amacı ile çimento hamurlarının Marsh-hunisi akış süresi ve mini-çökme değerleri incelenmiştir. Tüm hamur karışımları, Aitcin'in (2004) önerdiği metoda uygun olarak, su/çimento oranı 0.35 alınarak üretilmiştir. Tüm harç karışımlarında ise, su/çimento oranı, kum/bağlayıcı oranı ve yayılma değeri sırasıyla, 0.485, 2.75 ve 270±20 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen yayılma değerlerini sağlamak için tek tip polikarboksilat-eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Rötre azaltıcı katkı içeren tüm karışımlara, çimento ağırlığının %2'si kadar rötre azaltıcı katkı ilave edilmiştir. Karışımların 28 günlük kuruma rötresi, 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ve 28 günlük su emme kapasiteleri kıyaslanmıştır. Yapılan tüm taze ve sertleşmiş hal özellikleri incelenerek söz konusu özellikler açısından en üstün performans gösteren rötre azaltıcı katkı tespit edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, birinci aşamada en başarılı olarak tespit edilen SRA kullanılarak beton karışımları üretilmiştir. Üretilen beton karışımlarının taze ve sertleşmiş hal özellikleri incelenmiştir. Tüm beton karışımlarında, su/çimento oranı ve çökme değeri sırasıyla, 0.4 ve 210±20 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen çökme değerlerini sağlamak için tek tip polikarboksilat-eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Tüm beton karışımlarının, 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları, 28 günlük su emme kapasiteleri ve kuruma rötresi değerleri incelenmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında ise, tek tip PF kullanımının beton karışımlarının çökme, basınç

dayanımı, su emme kapasitesi ve kuruma rötresi davranışı araştırılmıştır. PF içeren tüm karışımlara, toplam hacmin %1'i oranında PF ilave edilmiştir.

Çalışmanın dördüncü aşamasında ise, hacimce %1 oranında PF ve çimento ağırlığının %2'si oranında, birinci aşamada performans açısından en başarılı seçilen SRA kullanılarak aynı su/çimento oranında ve aynı çökme değerinde beton karışımları hazırlanmıştır. İstenilen çökme değerini sağlamak için tek tip polikarboksilat-eter esaslı yüksek oran su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Hazırlanan beton karışımlarının taze ve sertleşmiş hal özellikleri tekrardan incelenmiştir.

## 4.2. Malzemeler

### 4.2.1. Çimento

Üretim aşamasında tek tip CEM I 42.5 R çimento kullanılmıştır. Çimentonun bazı özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Çimentonun kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikler

Oksit (%)	Çimento	Fiziksel özellikleri	
SiO <sub>2</sub>	18.86	Özgül ağırlık	3.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.71	<b>Mekanik özellikleri</b>	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.09	Basınç dayanımı (MPa)	1-günlük 14.7
CaO	62.70		2-günlük 26.80
MgO	1.16		7-dünlük 49.80
SO <sub>3</sub>	2.39		28-günlük 58.5
Na <sub>2</sub> O+0.658 K <sub>2</sub> O	0.92	<b>İncelik</b>	
Cl <sup>-</sup>	0.01	Özgül yüzey (Blaine, cm <sup>2</sup> /g)	3530
Çözünmeyen kalıntı	0.32	0.045 mm elekte kalıntı (%)	7.6
Kızdırma kaybı	3.20		
Serbest CaO	1.26		

### 4.2.2. Agrega

Harç karışımlarında, agrega olarak TS EN 196-1 standardına uygun tane boyut dağılımı Çizelge 4.2'de gösterilen standart kum kullanılmıştır.

**Çizelge 4.2.** Standart Kumun Tane Boyu Dağılımı

<b>Kare Göz Açıklığı</b>	<b>Kalan (%)</b>	<b>Kümülatif Elekte Kalan (%)</b>
2.00	0	0
1.60	4.32	7±5
1.00	33.98	33±5
0.50	67.11	67±5
0.16	86.85	87±5
0.08	99.83	99±5

Beton karışımlarında ise, iri ve ince agrega olarak kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. TS EN 1097-6 standardına göre belirlenen agregaların özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Ayrıca agregaların elek analizi TS EN 206 standardına göre gerçekleştirilmiş ve Çizelge 4.4'te verilmiştir. Beton karışımlarında, toplam agrega hacminin %50'si kadar 0-5 mm, %20'si kadar 5-15 mm ve %30'u kadar 15-25 mm kırma kireç taşı agregası kullanılmıştır.

**Çizelge 4.3.** Beton karışımlarında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

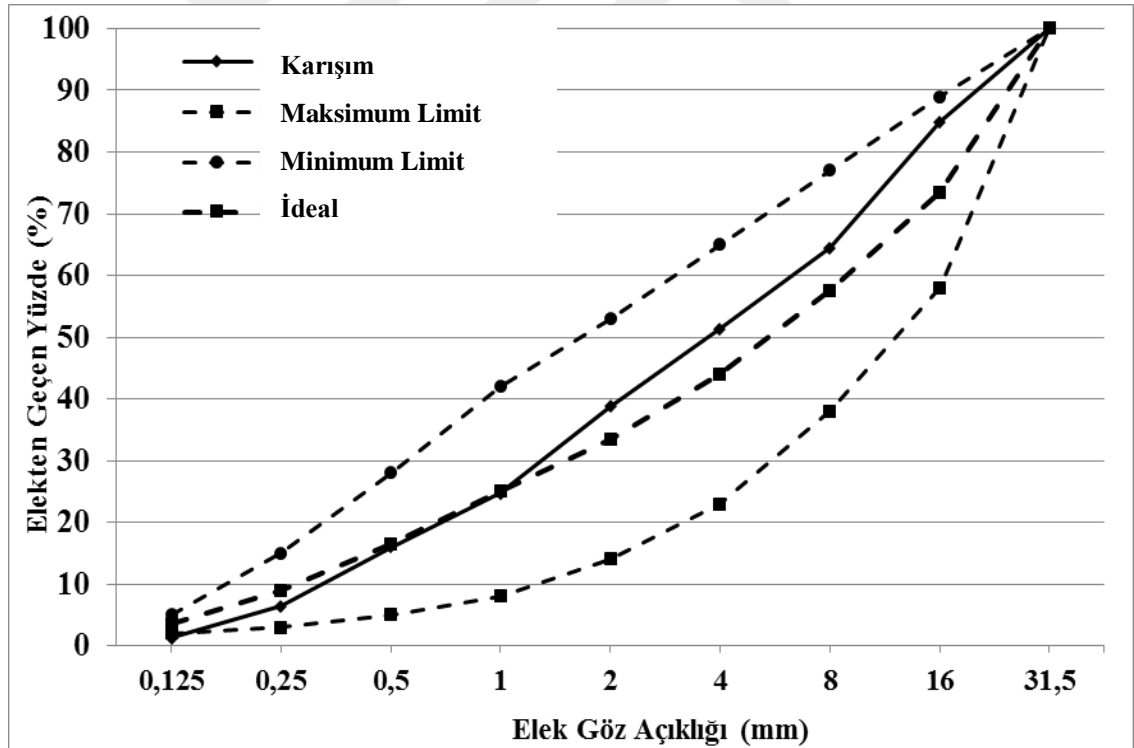
<b>Agrega</b>		<b>Özgül ağırlık</b>	<b>Su emme kapasitesi (%)</b>
<b>Tip</b>	<b>Boyut (mm)</b>		
	0-5	2,68	1
<b>Kireçtaşı</b>	5-15	2,69	0.31
	15-25	2,69	0.35

**Çizelge 4.4.** Karışımlarda kullanılan agregaların elek analizi sonuçları

**Elekten Geçen (%)**

Elek Göz Açıklığı	0-5 mm	5-15 mm	15-25 mm
31,5	100	100	100
16	100	100	49,7
8	100	72,2	0,1
4	100	7	0
2	77,5	0	0
1	49,3	0	0
0,5	32	0	0
0,25	12,9	0	0
0,125	2,5	0	0

Agrega karışımının gradasyon eğrisi ve TS EN 206 standart limitleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi agrega karışımlarının gradasyon eğrisi ilgili standart limitleri arasında ve ideal eğriye yakın olmuştur.



**Şekil 4.1.** Agrega karışımının gradasyon eğrisi ve TS EN 206 standart limitleri

#### 4.2.3. Süper Akışkanlaştırıcı

Harç karışımlarında istenilen yayılma ve beton karışımlarında istenilen çökme değerlerini sağlamak için farklı oranlarda tek tip polikarboksilat-eter esaslı yüksek oran su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkının üretici firma tarafından verilen bazı özellikleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Süper akışkanlaştırıcı katkıya ait özellikler

Tip	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Katı Madde Miktarı (%)	pH Değeri	Klorür İçeriği (%)	Alkali İçeriği (Na <sub>2</sub> O) (%)
Süper Akışkanlaştırıcı Katkı	1,097	36,35	3,82	<0,1	<10

#### 4.2.4. Rötire Azaltıcı Katkı (SRA)

Harç ve beton karışımlarında, rötire azaltıcı katkıların (SRA) etkisini incelemek amacı ile 4 farklı firmanın ticari ürünü olan toplamda 9 adet SRA temin edilmiştir. SRA içeren karışımlarda, söz konusu katkının kullanım oranı çimento ağırlığının %2'si olarak sabit tutulmuştur. Kullanılan katkıların üretici firma tarafından verilen bazı özellikleri Çizelge 4.6'da özetlenmiştir.

**Çizelge 4.6** Rötire azaltıcı katkı özellikleri

Tip	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Katı Madde Miktarı (%)	pH Değeri	Klorür İçeriği (%)	Alkali İçeriği (Na <sub>2</sub> O) (%)
Rötire azaltıcı katkı	1,01	95	4.0–8.0	<0,1	<10

#### 4.2.5. Polipropilen Lif

Lif içeren karışımlarda 0.5x1.15x5 mm boyutlarında prizmatik polipropilen lif kullanılmıştır. Kullanılan lifin yoğunluğu ve çekme dayanımı üretici tarafından sırasıyla 0.92 g/cm<sup>3</sup> ve 400-600 N/mm<sup>2</sup> olarak verilmiştir. Lif içeren tüm karışımlarda, lif

kullanım oranı toplam hacmin %1'i olarak sabit tutulmuştur.

### **4.3. Karışımların Hazırlanması**

#### **4.3.1. Çimento Hamuru Karışımlarının Hazırlanması**

Çalışma kapsamında öncelikle, SRA'nın Marsh hunisi akış süresi ve mini-çökme değerlerine etkisini incelemek amacıyla çimento hamuru karışımları hazırlanmıştır. Önceki çalışmalar göz önüne alınarak, su/çimento oranı 0.35 seçilmiştir (Aitcin 2004). Kontrol karışımına ilaveten, çimento ağırlığının %2'si oranında, 9 farklı SRA kullanılarak toplam 10 seri karışım hazırlanmıştır. Her seri hamur karışımı için, %0,5'den %2,25'e kadar 8 değişik oranda süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Test prosedürlerinde, Aitcin (2004) ve Kantro'nun (1980) yaptığı uygulamalar esas alınmıştır. Bu aşamada, SRA katkı içeren çimento hamuru karışımları A, B, C, D, E, F, G, H ve I olarak isimlendirilmiştir.

#### **4.3.2. Harç Karışımlarının Hazırlanması**

Harç karışımları, ASTM C109 standardına uygun olacak şekilde hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda su/çimento oranı, kum/çimento oranı ve yayılma değeri sırasıyla, 0.485, 2.75 ve  $230 \pm 20$  mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen yayılma değerini sağlamak için üretici firma tarafından temin edilen, tek tip polikarboksilat-eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Harç karışımları homojen olarak Hobart mikserinde hazırlanmıştır. Harç karışımı üretiminde kullanılan malzeme miktarı Çizelge 4.7'de verilmiştir. Bu aşamada, SRA katkı içeren harç karışımları A, B, C, D, E, F, G, H ve I olarak isimlendirilmiştir.



**Çizelge 4.7.** Harç Karışımlarının Üretimde Kullanılan Ağırlıkça Malzeme Oranı ve Yayılma Değeri

Numune Adı	Çimento	Su	Kum	SRA	SA*	Yayılma (cm)
Kontrol	1	0.485	2.7	0	0.003	23
A	1	0.485	2.7	0.02	0.003	24
B	1	0.485	2.7	0.02	0.003	23
C	1	0.485	2.7	0.02	0	23
D	1	0.485	2.7	0.02	0.004	24
E	1	0.485	2.7	0.02	0.004	22
F	1	0.485	2.7	0.02	0.001	23
G	1	0.485	2.7	0.02	0.002	23
H	1	0.485	2.7	0.02	0.002	22
I	1	0.485	2.7	0.02	0.002	24

\*SA; süper akışkanlaştırıcı katkı

### 4.3.3. Beton Karışımlarının Hazırlanması

Daha önece de vurgulandığı gibi, bu tez çalışması 3 farklı aşamadan oluşmaktadır. Çalışmamızın ikinci ve üçüncü aşamasında, çalışmanın birinci aşamasında en başarılı olduğu tespit edilen SRA kullanılarak beton karışımları üretilmiştir. Üretilen beton karışımlarında SRA ve PF kullanımının etkisi kıyaslanmıştır. Bu amaçla, SRA ve propilen lif içermeyen kontrol karışımına ilaveten, 3 seri beton karışımı daha hazırlanmıştır. Birinci seri beton karışımında çimento ağırlığının %2'si kadar SRA kullanılmıştır. İkinci seride toplam hacmin %1'i kadar polipropilen lif ilave edilmiştir. Üçüncü seride ise çimento ağırlığının %2'si kadar SRA ve toplam hacmin %1'i kadar polipropilen lif ilave edilmiştir. Tüm beton karışımlarda su/çimento oranı, çimento dozajı ve çökme değerleri sırasıyla, 0.40, 450 kg/m<sup>3</sup> ve 210 ± 20 mm olarak sabit tutulmuştur.

1 m<sup>3</sup> beton karışımı için teorik ve düzeltilmiş malzeme miktarları sırasıyla Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9'da verilmiştir. Çizelge 4.8'den görüldüğü gibi, PF kullanımıyla beton karışımlarında hedeflenen çökme değerini sağlamak için lif içermeyen karışımlara kıyasla %50 oranında daha fazla su azaltıcı katkı kullanılmıştır.

**Çizelge 4.8.** 1 m<sup>3</sup> beton karışımı için teorik karışım oranları

Karışım	Çimento (kg)	Su (kg)	Agrega (mm)			Lif (kg)	SA* (kg)	SRA* (kg)	Slump (mm)	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	
			0-5	5-15	15-25					Teorik	Ölçülen
			(kg)	(kg)	(kg)						
C	450	180	882	354	531	0	2.4	0	210	2399	2360
SRA	450	180	870	349	524	0	2.4	9	200	2384	2445
PF	450	180	867	348	522	10.4	3.6	0	210	2381	2325
SRA+PF	450	180	855	343	515	10.4	3.6	9	220	2366	2390

\* Süper akışkanlaştırıcı

\*Rötre azaltıcı katkı

**Çizelge 4.9.** Düzeltilmiş karışım oranları

Karışım	Çimento (kg)	Su (kg)	Agrega (mm)			Lif (kg)	SA* (kg)	SRA* (kg)
			0-5	5-15	15-25			
			(kg)	(kg)	(kg)			
C	443	177	868	348	522	0	2.36	0
SRA	461	185	892	358	537	0	2	9
PF	439	176	847	340	510	10.2	3.52	0
SRA+PF	455	182	864	346	520	10.5	3.64	9.09

\* Süper akışkanlaştırıcı

\*Rötre azaltıcı katkı

## **4.4. Çalışmada Uygulanan Deneyler**

### **4.4.1. Hamur Karışımı Deneyler**

#### **4.4.1.1. Marsh Hunisi Akış Süresi ve Mini Çökme**

Çimento hamuru karışımlarında, Marsh hunisi akış süreleri ve mini çökme değerlerinin tespiti için sırasıyla, Aitcin (2004) ve Kantro'nun (1980) önerdiği metod uygulanmıştır.

### **4.4.2. Harç Karışımı Deneyleri**

#### **4.4.2.1. Yayılma**

Harç karışımlarının yayılma değerleri ASTM C1437 standardına uygun olacak şekilde ölçülmüştür. İstenilen yayılma değerini sağlamak için tek tip polikarboksilat-eter esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

#### **4.4.2.2. Basınç Dayanımı**

Söz konusu harç karışımlarının, 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı 50 mm'lik küp numuneler üzerinde ASTM C109 standardına göre belirlenmiştir. Her seri karışım için 3 adet küp numune üretilmiştir.

#### **4.4.2.3. Su Emme Oranı**

28 günlük sertleşmiş harç numunelerinin ağırlıkça su emme kapasiteleri ASTM 642-97 Standardına göre 100 mm küp numuneler üzerinde tespit edilmiştir. Karışımların söz konusunu su emme oranları Denklem 4.1'e göre hesaplanmıştır.

$$m = \frac{b-a}{a} \times 100 \quad (4.1)$$

Burada b, numunelerin suya doygun yüzey kuru ağırlığını ve a, etüv kurusu ağırlığını ifade etmektedir.

#### 4.4.2.4. Kuruma Rötresi

Karışımların kuruma rötresini incelemek amacı ile her seri için üçer adet 25x25x285 mm prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 48 saat boyunca sıcaklığı 20°C suda kürlenmiştir. Daha sonra kür havuzundan çıkarılıp sıcaklığı 20°C ve bağıl nemi %55 olan bir odada bekletilmiştir. Bu ortamda prizmatik numunelerin boy değişimi Denklem 4.2' de gösterildiği gibi ASTM C 596-01 Standardına göre hesaplanmıştır.

$$S = \frac{L_1 - L}{L_0} \times 100 \quad (4.2)$$

Burada, S numunenin büzülme yüzdesini,  $L_1$  kür havuzundan çıkarıldıktan sonra başlangıç ölçüm değerini, L geçen günlere göre periyodik ölçüm değerini,  $L_0$  efektif ölçüm boyunu ifade etmektedir. Harç karışımlarının kuruma rötresi ölçümüne ait görsel Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Harç karışımlarının kuruma rötresi ölçümü

### **4.4.3. Beton Karışımı Deneyleri**

#### **4.4.3.1. Çökme**

Hazırlanan beton karışımlarının çökme ve taze hal birim hacim ağırlıkları sırasıyla TS EN 12350-2 ve TS EN 12350-6 Standartlarına göre ölçülmüştür.

#### **4.4.3.2. Basınç Dayanımı**

Beton karışımlarının 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları TS EN 12390-3 Standardına uygun olacak şekilde 100 mm küp numuneler üzerinde belirlenmiştir.

#### **4.4.3.3. Su Emme Oranı**

28 günlük sertleşmiş beton numunelerinin ağırlıkça su emme oranları ASTM 642-97 Standardına göre 100 mm küp numuneler üzerinde tespit edilmiştir. Karışımların söz konusunu su emme oranları Denklem 4.3'e göre hesaplanmıştır.

$$m = \frac{b-a}{a} \times 100 \quad (4.3)$$

Burada b, numunelerin 24 saat suda bekletildikten sonra suya doymun yüzey kuru ağırlığını ve a, etüv kurusu ağırlığını ifade etmektedir.

#### **4.4.3.4. Kuruma Rötresi**

Beton karışımlarının kuruma rötresini incelemek amacıyla ASTM C157 Standardına uygun olacak şekilde her bir seri için üçer adet 75 mm x 75 mm x 285 mm prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış 48 saat boyunca 20°C sıcaklıkta kirece doymun suda bekletilmiştir. Daha sonra sudan çıkarılıp sıcaklığı 20°C ve bağıl nemi %55 olan bir ortamda bekletilmiş ve belirli günlerde boy ölçümleri alınmıştır. Prizmatik numunelerin boy değişimleri Denklem 4.4'te gösterildiği

gibi hesaplanmıştır.

$$S = \frac{L_1 - L}{L_0} \times 100 \quad (4.4)$$

Burada, S numunenin büzülme yüzdesini,  $L_1$  kür havuzundan çıkarıldıktan sonra başlangıç ölçüm değerini, L sonraki günlerde ölçüm değerlerini,  $L_0$  etkin ölçüm boyunu ifade etmektedir.



## **5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

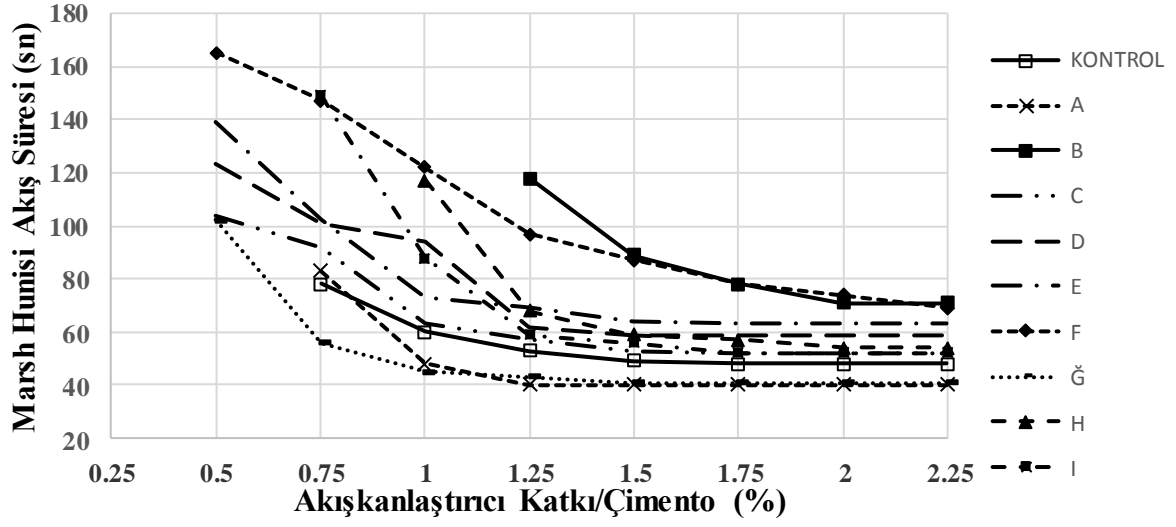
### **5.1. Hamur Deneylerine İlişkin Sonuçlar**

#### **5.1.1. Marsh Hunisi Akış Süresi ve Mini Çökme Deneyi**

Hamur karışımlarının Marsh hunisi akış süreleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, sahip oldukları yüksek vizkozite sebebiyle 0,5 oranında süper akışkanlaştırıcı içeren bazı karışımlar Marsh-hunisinden akmamıştır. SRA içeriğinden bağımsız olarak, süper akışkanlaştırıcı katkı kullanım oranının artışıyla hamur karışımlarının akış süreleri beklenildiği gibi azalmıştır. Ancak, belli bir orandan sonra karışımların Marsh hunisi akış sürelerinde ciddi bir artış gözlemlenmemiştir. Bilindiği gibi, söz konusu bu katkı/çimento oranı kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkının doygunluk noktasıdır.

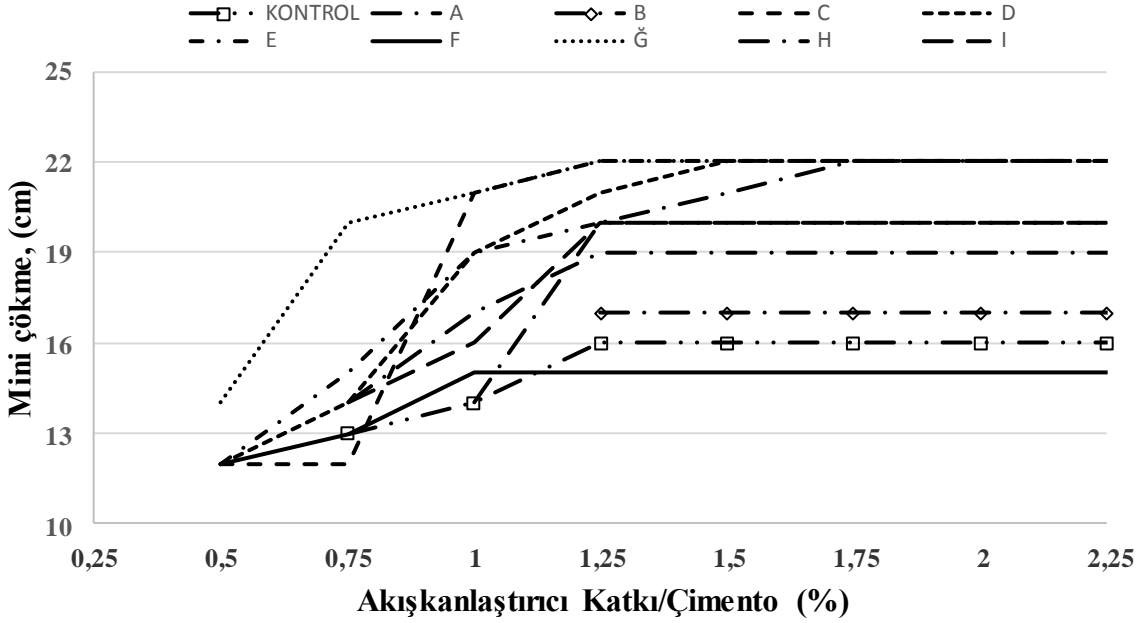
Deney sonuçlarına göre, süper akışkanlaştırıcı katkının doygunluk noktası kontrol karışımında %1 olarak tespit edilmiş iken, SRA içeren diğer karışımlarda %1,25 olarak tespit edilmiştir.

Deney sonuçlarından da anlaşıldığı gibi, SRA katkı kullanımıyla çimento hamuru karışımlarının Marsh hunisi akış süreleri genel olarak olumsuz etkilenmiştir.



Şekil 5.1. Hamur karışımlarının Marsh hunisi akış süreleri

Hamur karışımlarının mini çökme değerleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, SRA kullanımı genel olarak hamur karışımlarının mini-çökme değerlerini olumlu etkilenmiştir.



Şekil 5.2. Hamur karışımlarının mini çökme değerleri



## 5.2. Harç Deneilerine İlişkin Sonuçlar

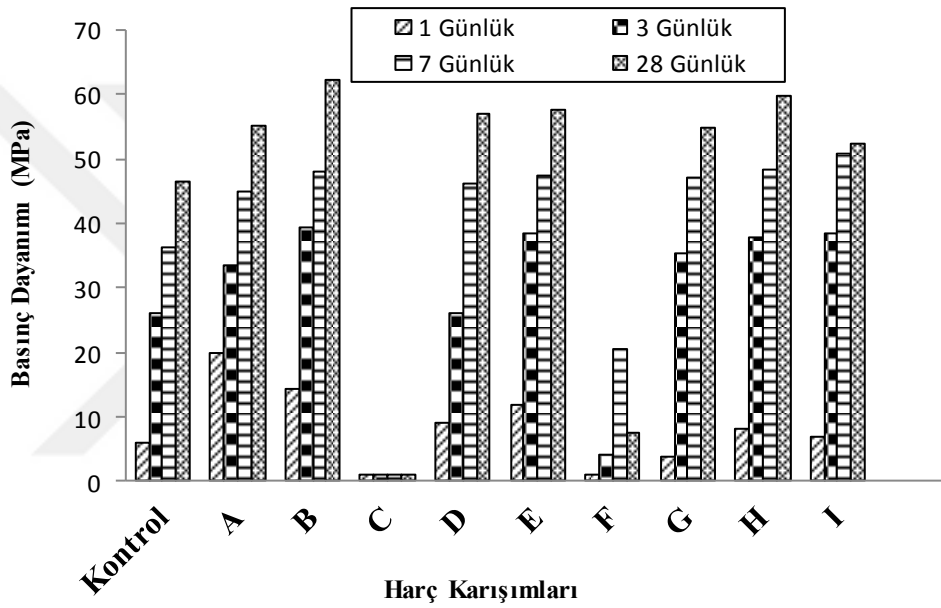
### 5.2.1. Yayılma

Harç karışımlarının yayılma miktarları daha önce karışımların hazırlanması başlığı altında Çizelge 4.7'de verilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi tüm harç karışımlarında yayılma değeri  $230 \pm 20$  mm olarak sabit tutulmuştur. SRA içermeyen kontrol karışımında hedef yayılma değerini sağlamak için çimento ağırlığının %0,3'ü kadar su azaltıcı katkı kullanılmıştır. A ve B karışımlarında da söz konusu yayılma değerini sağlamak için aynı miktarda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. G, H ve I karışımlarında söz konusu su azaltıcı katkı miktarı %0,1 olmuştur. D ve E karışımlarında bu değer kontrol karışımının daha üstünde bir değer olarak (%0,4) tespit edilmiştir. Ancak, C ve F karışımlarında hedef yayılmayı sağlamak için süper akışkanlaştırıcı katkı gereksinimi azalmıştır. Hatta C karışımında süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmadan 230 mm yayılma değeri gözlemlenmiştir. Söz konusu C ve F katkıları, üretici firma beyanına göre hava sürüklemek suretiyle karışımların boşluk yapısını değiştirerek kuruma rötresi davranışını olumlu etkilemektedir. Söz konusu bu SRA'ları kullanarak karışımların işlenebilirliğinin olumlu etkilenmesi bu katkıların hava sürükleme özelliğine sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak, bahsi geçen C ve F karışımları süper akışkanlaştırıcı katkı içermemesine veya çok az miktarda süper akışkanlaştırıcı katkı içermesine rağmen sırasıyla 7 ve 3 gün boyunca priz almamıştır. Söz konusu karışımlarda kullanılan SRA-çimento arasında bir uyumsuzluk oluşumu tespit edilmiştir. D, E ve F katkıları karışıma toz halinde eklenmiştir. D ve E karışımlarında istenilen yayılma değerini sağlamak için katkı gereksinimi kontrol karışımına kıyasla artış göstermiştir.

### 5.2.2. Basınç Dayanımı

Harç karışımlarının basınç dayanımı sonuçları Şekil 5.3'te özetlenmiştir. Her değer 3 ölçümün ortalamasını ifade etmektedir. SRA kullanımından bağımsız olarak harç karışımlarının basınç dayanımı zamanla artmıştır. SRA kullanımı ile harç karışımlarının hem erken hem de ileri yaş dayanımları genel olarak olumlu etkilenmiştir. Bu çalışma

kapsamında kullanılan SRA katkıları, üretici firma beyanına göre düşük viskozite özelliği sayesinde yüzey gerilmelerini azaltarak mikro çatlak oluşumunun azalmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple de karışımların dayanımının artmasına neden olmuştur. Ancak, C ve F karışımları sırasıyla 7 ve 3 gün boyunca priz almadıkları için karışımların dayanım değeri ölçülemedi. F karışımı ise diğer karışımların çok daha altında bir dayanım göstermiştir. Toz halinde olan D ve E SRA katkıları içeren karışımlar erken yaş dayanımlarında kontrol karışımının altında ancak 28 gün sonunda dayanım açısından kontrol karışımına benzer bir davranış göstermiştir.

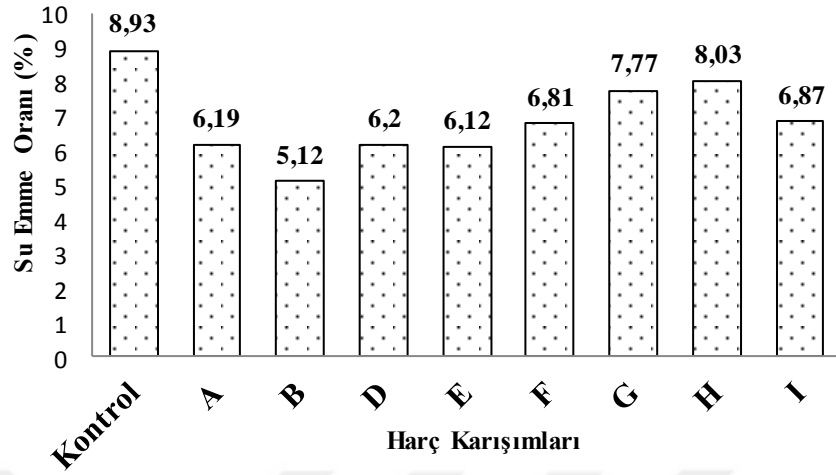


Şekil 5.3. Harç Karışımlarının Basınç Dayanımları (MPa)

### 5.2.3. Su Emme Oranı

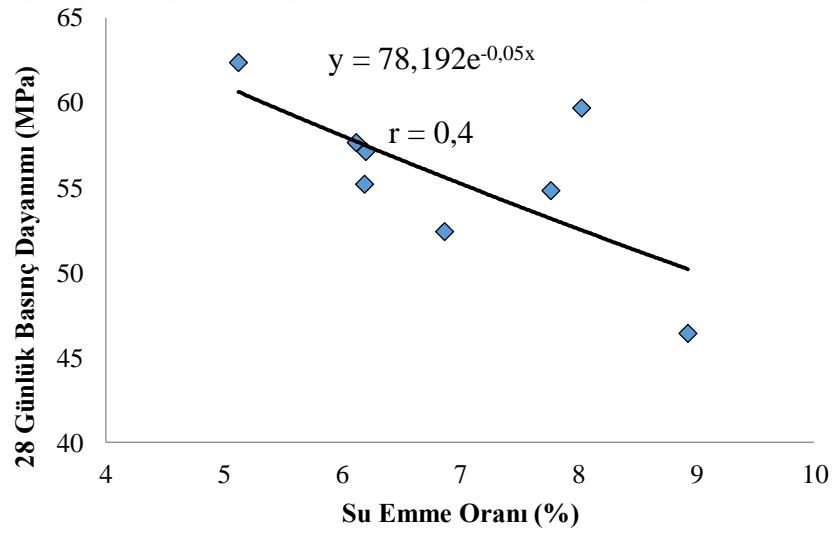
Harç karışımlarının 28 günlük su emme oranı Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Her değer 3 ölçümün ortalamasını ifade etmektedir. C karışımı priz almadığından su emme ölçümleri alınamamıştır. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, SRA kullanımı ile harç karışımlarının su emme oranı kontrol karışımına göre azaltmıştır. En düşük su emme oranı B karışımında gözlemlenmiştir. Söz konusu karışımın su emme oranı kontrol karışımına kıyasla %43 daha az olmuştur. Bu karışım basınç dayanımı açısından da en başarılı karışım olarak tespit edilmiştir. SRA kullanımı ile karışımların geçirgenliğinin azalması, yüzey gerilmelerinin azalması sonucu mikro çatlak oluşumunun daha az

olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.4. Harç Karışımlarının Su Emme Oranı

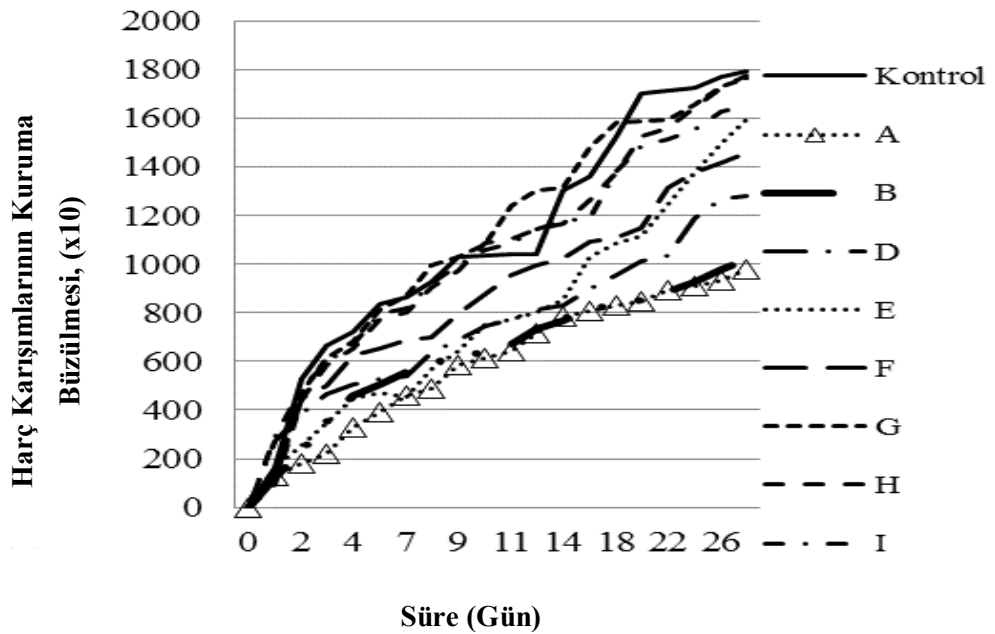
Harç karışımlarının 28 günlük basınç dayanımı ve su emme ilişkisi Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Karışımların basınç dayanımı ve su emme oranı arasında zayıf bir üstel ilişkinin mevcut olduğu Şekil 5.5'ten de anlaşılmaktadır.



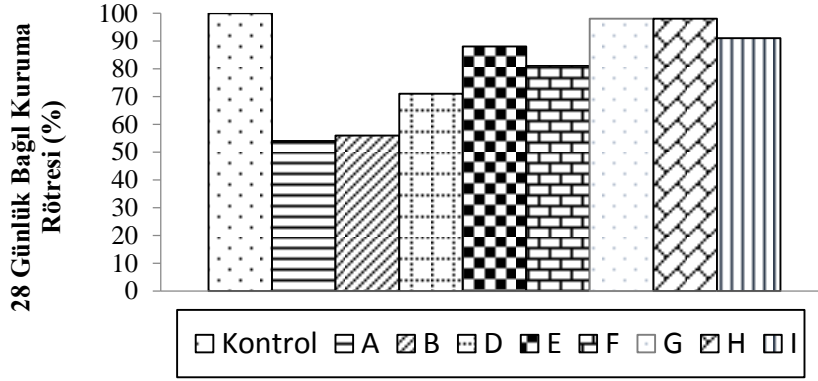
Şekil 5.5. Harç Karışımlarının 28 Günlük Basınç Dayanımı ve Su Emme Oranı Arasındaki İlişki

#### 5.2.4. Kuruma Rötresi

Harç karışımlarının kuruma rötresi ölçüm sonuçları ve bağıl rötre değerleri sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Her değer 3 ölçüm ortalamasını ifade etmektedir. C karışımı 7 gün boyunca priz almadığı için kuruma rötresi ölçümleri alınamamıştır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, SRA kullanımından bağımsız olarak karışımların ilk günlerde büzülme artışı şiddeti yüksek iken zamanla büzülme artışı şiddeti azalmıştır. SRA kullanımı ile harç karışımlarının rötre değerleri kontrol karışımının altında bir değer olmuştur. Ancak G, H ve I karışımları rötre davranışı açısından kontrol karışımına benzer bir davranış göstererek başarısız bir sonuç ortaya koymuştur. Bilindiği gibi, çimentolu sistemlerde su kaybı sonucu büzülme olayı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla karışım geçirgenliği büzülme davranışını ciddi mertebede etkilemektedir. Tüm karışımlar arasında en düşük su emme oranına sahip olan B karışımının kuruma rötresi davranışı açısından diğer karışımlara kıyasla, en başarılı karışım olduğu deney sonuçlarından da görülmektedir. 28 gün sonunda söz konusu karışımın rötre miktarı kontrol karışımına kıyasla %43 daha az olmuştur.

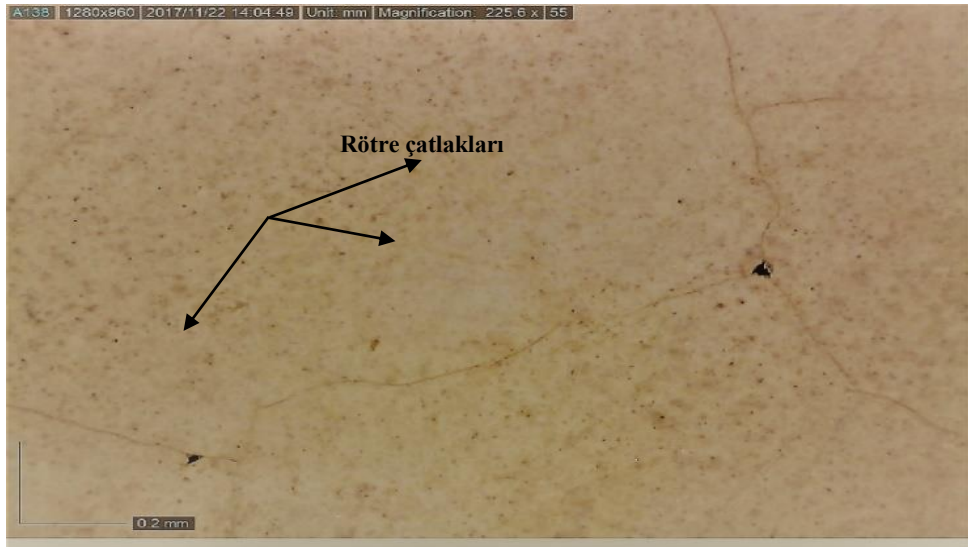


Şekil 5.6. Harç Karışımlarının Kuruma Rötresi Değerleri

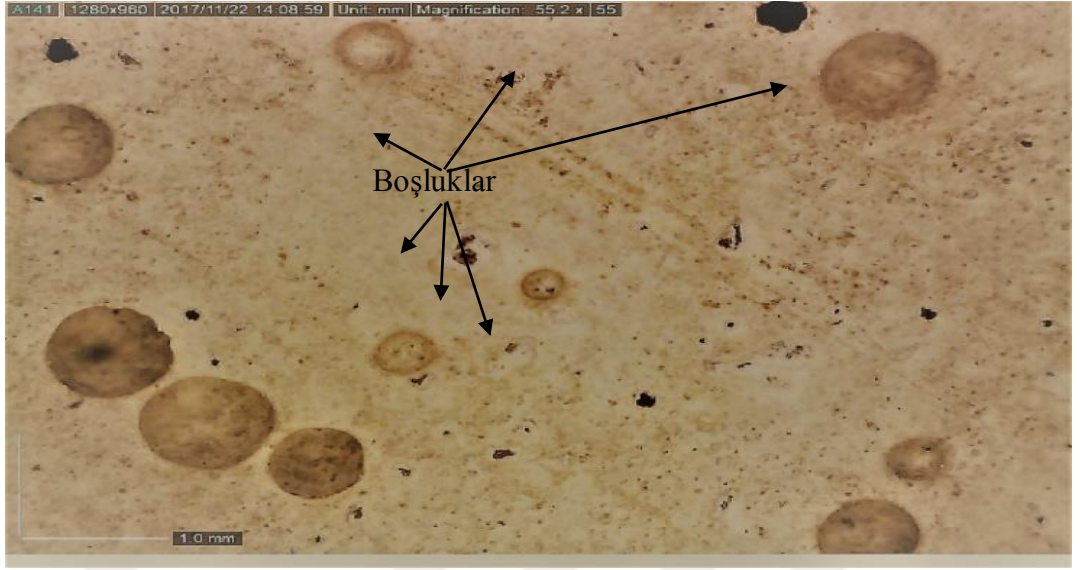


**Şekil 5.7.** Harç Karışımlarının 28 Günlük Bağlı Kuruma Rötresi Değerleri

Bunlara ilaveten, harç karışımlarında kuruma rötresi döngü sonrası çatlak oluşumu, mikro-yapı analizi gerçekleştirilerek gözlemlenmiştir. SRA içeren harç karışımlarının yüzeyinde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Burada, kuruma-büzülme davranışı açısından en iyi performansı gösteren A karışımına ait mikroskobik görüntü Şekil 5.8’de gösterilmiştir. SRA içermeyen kontrol karışımının mikroskobik görüntüsü Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, kuruma-büzülme döngü sonrası numune yüzeyinde büzülme çatlakları oluşmuştur.

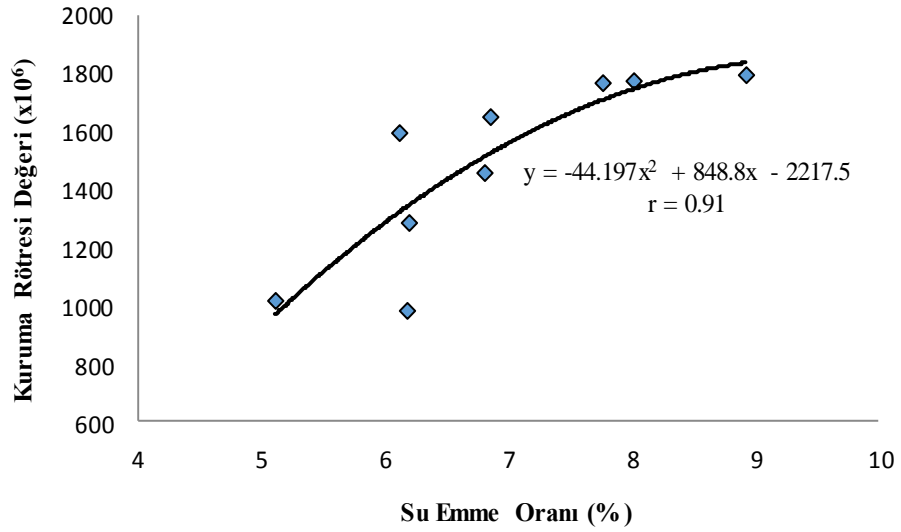


**Şekil 5.8.** SRA içeren A karışımının mikroskobik görüntüsü



**Şekil 5.9.** SRA içermeyen kontrol karışımının mikroskopik görüntüsü

Harç karışımlarının su emme oranı ve 28 gün sonundaki rötne değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi harç karışımlarının su emme ve rötne değerleri arasında nispeten kuvvetli polinomsal bir ilişki mevcuttur.



**Şekil 5.10.** Harç Karışımlarının 28 Günlük Kuruma Rötresi Değerleri ve Su Emme Oranı Arasındaki İlişki

### 5.3. Beton Deneylerine İlişkin Sonuçlar

#### 5.3.1. Çökme

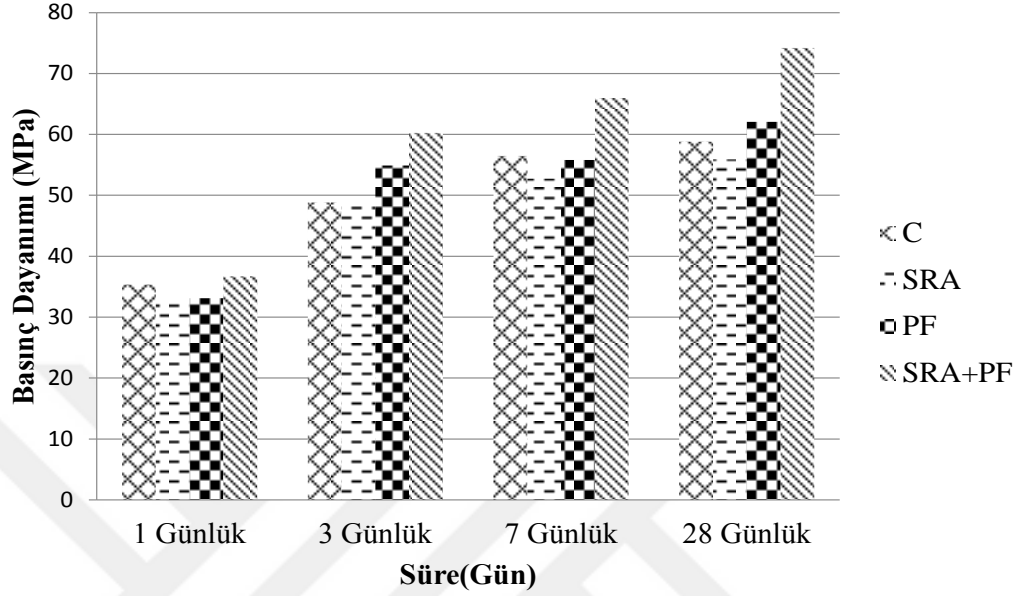
Çalışma kapsamında üretilen beton numunelerinin çökme (slump) değerleri daha önce beton karışımlarının hazırlanması başlığı altında Çizelge 4.8'de gösterilmiştir. Çizelge 4.8'den de anlaşılacağı gibi tüm karışımlarda çökme değeri  $210 \pm 20$  mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen çökme değerlerini sağlamak için değişik miktarlarda tek tip süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Çizelge 4.8'den de görüldüğü gibi, PF kullanımıyla beton karışımlarında hedeflenen çökme değerini sağlamak için lif içermeyen karışımlara kıyasla %50 oranında daha fazla süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Bu olumsuz etki lif kullanımıyla karışımlarda topaklaşma riskinin artışından kaynaklanmaktadır.

#### 5.3.2. Basınç Dayanımı

Beton karışımlarının basınç dayanımı değerleri Şekil 5.11'de verilmiştir. Her değer 3 ölçümün ortalamasını ifade etmektedir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi kontrol karışımına kıyasla SRA katkısı kullanımıyla beton karışımlarının basınç dayanımı olumsuz etkilenmemiştir. Ancak, SRA karışımının 1 günlük dayanımlarında az da olsa bir miktar azalmalar tespit edilmiştir. Söz konusu karışımda SRA kullanımı ile beton karışımlarının priz süresinin azaldığı gözlemlenmiştir. 1 günlük dayanımlardaki düşüş bu çalışmada kullanılan SRA katkısının priz geciktirme etkisine sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kontrol karışımına kıyasla lif içeren beton karışımlarının 1, 3, 7, 28 günlük dayanımları sırasıyla %7, %25, %15, %16 oranlarında artış göstermiştir. Lif kullanımıyla basınç dayanımlarının artışı beton karışımlarında lifin homojen dağıldığının bir göstergesi olabilir. Mardani Aghabaglou (2016) ve arkadaşlarına göre lifin homojen şekilde dağıldığı bir beton karışımında, basınç yüklemesi esnasında, numunenin yanal deformasyonlarının lifler tarafından engellenmesi sebebiyle basınç dayanımı

artmaktadır. PF ve SRA katkının beraber kullanıldığı SRA+PF karışımı basınç dayanımı açısından en yüksek performansı göstermiştir.

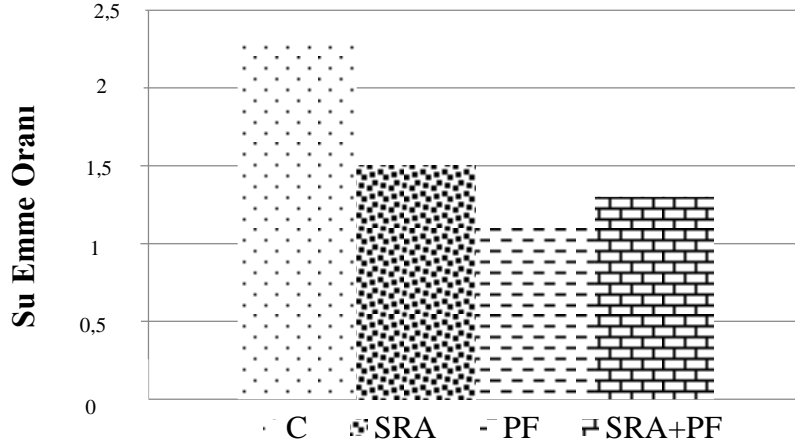


Şekil 5.11. Beton karışımlarının basınç dayanımları (MPa)

### 5.3.3. Su Emme Oranı

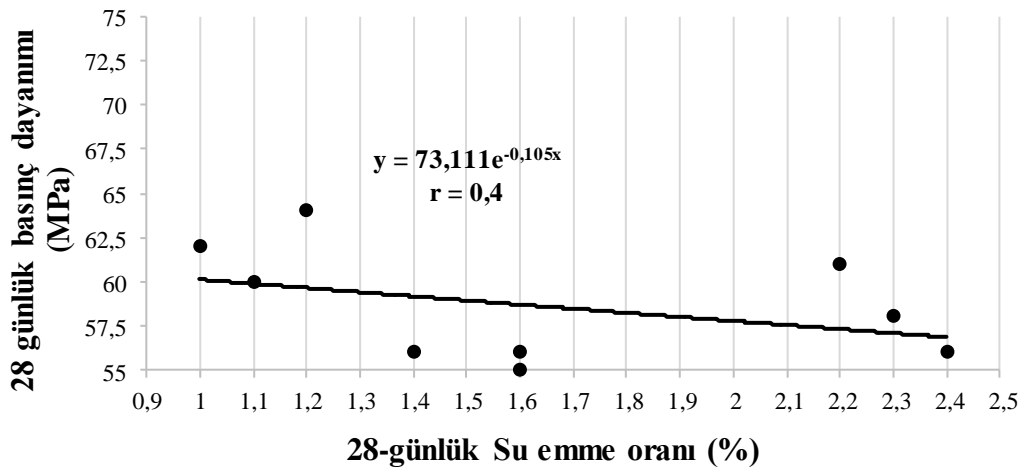
Beton karışımlarının 28-günlük su emme oranı Şekil 5.12’de verilmiştir. Her değer 3 ölçümün ortalamasını ifade etmektedir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi SRA ve lif kullanımından bağımsız olarak tüm beton karışımların su emme kapasitesinin %3’ten az olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, üretilen beton karışımları CEB-FIB tarafından önerilen sınıflandırmaya göre su emme bakımından iyi beton olarak değerlendirilmektedir. SRA ve PF kullanımıyla beton karışımlarının su emme oranları kontrol karışımına kıyasla azalmıştır.





Şekil 5.12. Beton karışımlarının 28-günlük su emme oranı

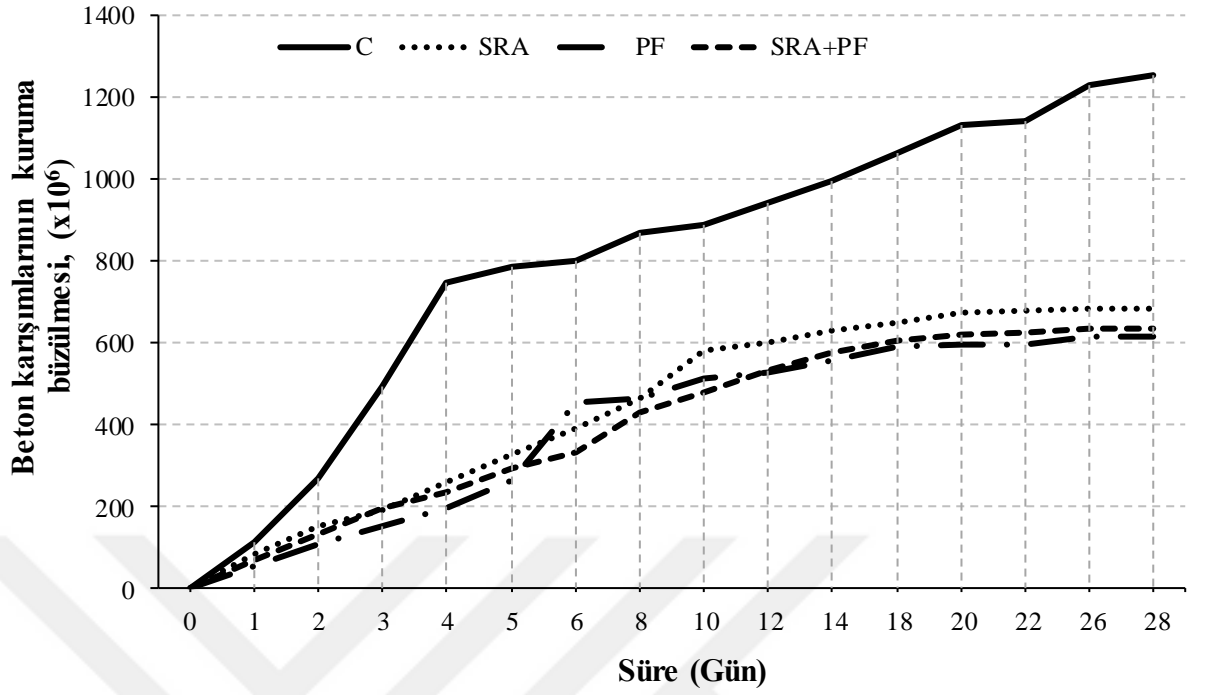
Beton karışımlarının 28-günlük su emme kapasitesi ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Bilindiği gibi beton karışımlarında boşluk oranının artmasıyla su emme oranı artarken, basınç dayanımları azalmaktadır. Ancak Şekil 5.13'ten de görüldüğü gibi, beklentinin tersine karışımların su emme oranı ve basınç dayanımı arasında zayıf bir exponansiyel ilişkinin mevcut olduğu anlaşılmıştır.



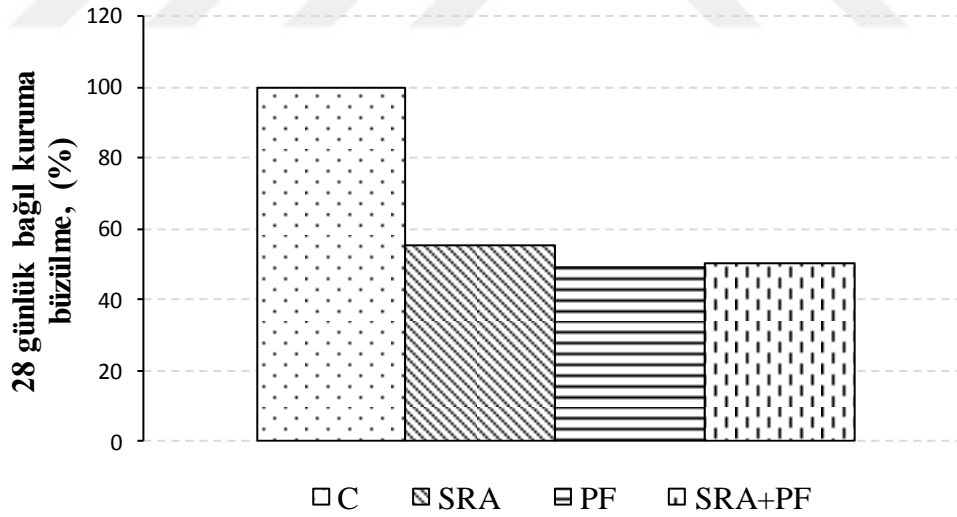
Şekil 5.13. Beton karışımlarının 28-günlük su emme oranı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

#### 5.3.4. Kuruma Rötresi

Beton karışımlarının kuruma-büzülme ölçüm sonuçları ve bağıl büzülme değerleri sırasıyla Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te gösterilmiştir. Her değer 3 ölçüm ortalamasını ifade etmektedir. Beklenildiği gibi, SRA ve lif kullanımından bağımsız olarak karışımların ilk günlerdeki büzülme artışı şiddeti yüksek iken zamanla büzülme artışı şiddeti azalmıştır. SRA ve PF kullanımıyla kontrol karışımına kıyasla karışımların büzülme değerleri azalmıştır. Söz konusu büzülme farkı zamanla daha belirgin hale gelmiştir. Betonda kapiler boşluklarda bulunan boşluk suyu buharlaştığı zaman betonun içyapısında çekme gerilmeleri meydana gelerek büzülme çatlaklarının oluşmasına sebep olmaktadır. SRA yüzey gerilmelerini azalttığı için büzülme sonucu beton yüzeyinde oluşan çatlakları azaltmaktadır. Karışımda bulunan polipropilen lifler ise çatlaklar arasında bir köprü görevi üstlenerek çatlak gelişimini engellemektedir. Şekil 5.15'ten de görüldüğü gibi 28 gün sonunda sadece PF içeren PF adlı karışım kontrol karışımına kıyasla yaklaşık %51 daha az kuruma-büzülme davranışı göstermiştir. Bu karışım büzülme davranışı açısından en başarılı karışım olmuştur. Diğer SRA ve SRA+PF karışımları PF karışımına benzer bir davranış göstererek kontrol karışımına göre sırasıyla %45 ve %50 oranlarında daha az büzülmüştür.



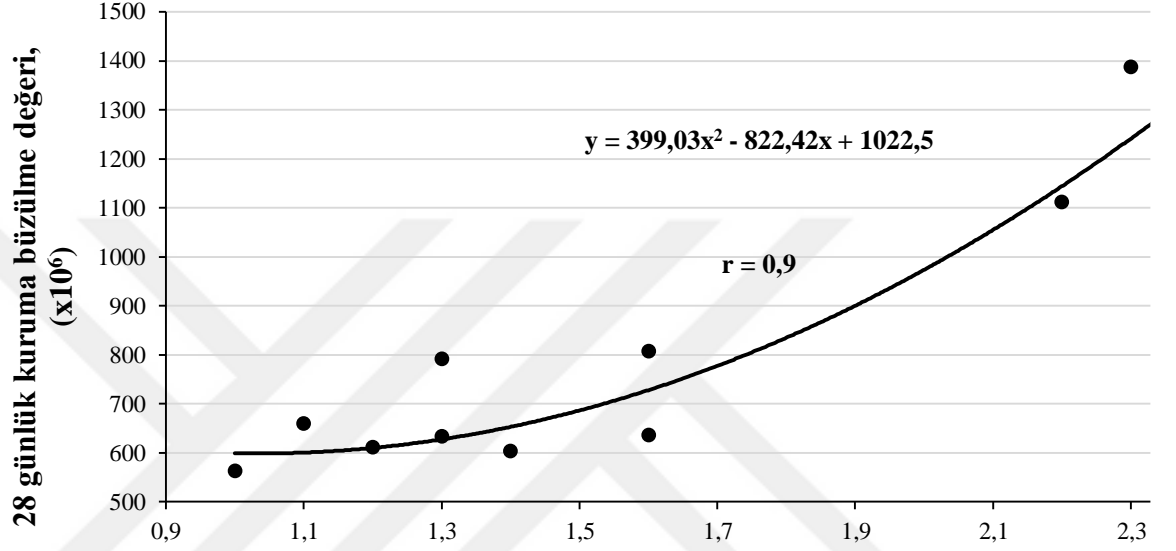
Şekil 5.14. Beton karışımlarının 28-günlük kuruma büzülme değerleri



Şekil 5.15. Beton karışımlarının 28-günlük bağıl kuruma büzülme değerleri

Beton karışımlarının 28-günlük su emme oranı ve büzülme değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Beton karışımlarının su emme ve büzülme değerleri arasında çok kuvvetli bir polinomsal ilişkinin mevcut olduğu şekilden de

anlaşılmaktadır. Bilindiği gibi kuruma-büzülme betondaki boşluk oranı ve yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda betondaki su emme oranının yüksek olması kapiler boşlukların miktarının fazla olduğunu göstermektedir. Betonda boşluk oranının artmasıyla kapiler boşluklardaki suyun kaybedilmesi hızlanacağından dolayı betonun kuruma-büzülme davranışını olumsuz etkilemektedir.



Şekil 5.16. Beton karışımlarının 28-günlük kuruma büzülme değerleri ve su emme oranı arasındaki ilişki

## 6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, SRA ve PF kullanımının çimentolu sistemlerin bazı taze ve sertleşmiş hal özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 4 aşamalı bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

Dokuz farklı ticari SRA'nın, harç ve hamur karışımlarının taze hal özelliklerine, kuruma rötresine, basınç dayanımına etkisinin incelendiği birinci aşamada, yapılan deney sonuçlarına dayanarak aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- SRA kullanımı çimento hamuru karışımlarının mini çökme değerlerini olumlu etkilerken, Marsh hunisi akış sürelerini ise olumsuz etkilemiştir.
- SRA kullanımıyla harç karışımlarının taze hal özellikleri olumlu etkilenmiştir. Ancak, biri toz biri sıvı olmak üzere 2 adet SRA kullanımı harç karışımlarının priz almamasına neden olmuştur. Söz konusu uyumsuz bu iki katkı harç karışımlarında hedef yayılma değerini sağlamak için süper akışkanlaştırıcı katkı gereksinimini azaltmıştır.
- SRA kullanımı sonucu harç karışımlarının basınç dayanımı ve geçirgenlik özelliği genel olarak olumlu etkilenmiştir.
- SRA kullanımı ile harç karışımlarının rötre değerleri kontrol karışımının altında bir değer olarak ölçülmüştür. Kontrol karışımına kıyasla rötre açısından en etkili olan SRA harç karışımlarının büzülme miktarında %45'lik bir düşüşe, en verimsiz SRA ise %10'luk bir düşüşe sebebiyet vermiştir.
- Bu aşama sonucu elde edilen veriler doğrultusunda, harç karışımların su emme ve rötre değerleri arasında nispeten kuvvetli polinomsal bir ilişkinin mevcut olduğu ancak su emme oranı ve dayanım değerleri arasında ise ilişkinin kurulamadığı tespit edilmiştir.
- Çalışmada kullanılan 9 adet SRA içinde, sıvı halinde olan SRA'lar, toz olan katkılardan daha başarılı olmuştur.

Birinci aşamada, harç karışımlarına ilişkin yapılan deneyler sonucu, en başarılı SRA seçilerek beton karışımlarının taze hal özelliklerine, su emme kapasitesine, kuruma

rötresine ve basınç dayanımına etkisinin incelendiği ikinci aşamada ise yapılan deney sonuçlarına dayanarak aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- SRA kullanımı sonucu beton karışımlarının basınç dayanımı ve geçirgenlik özelliği genel olarak olumlu etkilenmiştir.
- SRA kullanımı ile beton karışımlarının rötre değerleri kontrol karışımının altında bir değer olarak ölçülmüştür.
- Bu aşamadan elde edilen veriler doğrultusunda, karışımların su emme ve rötre değerleri arasında çok kuvvetli polinomsal bir ilişkinin mevcut olduğu ancak su emme oranı ve dayanım değerleri arasında ise zayıf bir polinomsal ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.

Üçüncü aşamada ise, tek tip polipropilen lif kullanımının beton karışımlarının taze hal özelliklerine, su emme kapasitesine, kuruma rötresine ve basınç dayanımına etkisinin incelendiği çalışmalarda ise yapılan deney sonuçlarına dayanarak aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Lif kullanımıyla hedef yayılma değerini sağlamak için süper akışkanlaştırıcı katkı gereksinimi artmıştır. Lif kullanımı sonucu beton karışımlarının basınç dayanımı ve geçirgenlik özelliği genel olarak olumlu etkilenmiştir.
- Üretilen beton karışımların, su emme ve rötre değerleri arasında çok kuvvetli polinomsal bir ilişkinin mevcut olduğu ancak su emme oranı ve dayanım değerleri arasında ise zayıf bir polinomsal ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.
- Lif kullanımı rötre açısından SRA'ya göre daha etkili olmuştur.

SRA ve propilen lifin beraber kullanıldığı dördüncü aşamadan elde edilen deney sonuçlarına göre, SRA ve propilen lifin beraber kullanılması büzülme davranışı

açısından ekstra bir fayda sağlamamış, ekonomik olarak da maliyet artışına sebebiyet vermiştir.



## 7. ÖNERİLER

Bu tez çalışması sonucunda elde edilen tecrübeler ışığında, aşağıda belirtilen öneriler yapılmıştır.

- Yüksek dayanımlı betonlarda aynı çalışma tekrarlanabilir. Beton ve harç karışımlarının 28 günlük kuruma rötresinin incelendiği bu çalışmaya ek olarak 90 günlük kuruma rötresi değerleri de araştırılabilir.
- Yüksek dayanımlı mineral katkı içeren karışımlarda SRA ve PF kullanımının kuruma rötresine etkisi incelenebilir.
- Benzer çalışmada, kuruma rötresi dışında plastik ve otojen rötre davranışları da incelenebilir.
- Tüm bu çalışmalarda, ek olarak PF ve SRA'nın maliyet tablosu çıkartılıp en ekonomik yöntem hesaplanabilir.



## KAYNAKLAR

**ACI 209.1R-05, 2017** Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete

**Aitcin, P. C., Neville, A., & Acker, P. 1997** Integrated view of shrinkage deformation. *Concrete International*, 19(9), 35-41.

**Aitcin, P.C., 2004** “*High Performance Concrete*”, E&FN SPON, New York.

**Akçay, B., 2007** “Effects of lightweight aggregates on autogenous deformation and fracture of high performance concrete” (Doctoral dissertation).

**Almudaiheem, J. A., Hansen, W, 1987** “Effect of specimen size and shape on drying shrinkage of concrete”, *Materials Journal*, 84(2), 130-135.

**Aly, T., Sanjayan, J. G., 2008** Collins, F., “Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes”, *Materials and Structures*, 41(10), 1741.

**ASTM C109-16, 2017** “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

**ASTM C157, 2017** “Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

**ASTM C1437-15, 2017** “Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

**ASTM C596-01, 2017** “Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

**ASTM C642-97, 1997** “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

**Baradan, B., Yazici, H., Ün, H. 2002** “Durability of reinforced concrete structures”, İzmir Dokuz Eylül University, *Faculty of Engineering Publication*, 282.

**Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2010** “Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık”, *Türkiye Hazır Beton Birliği*.

**Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2015** “Beton”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*.

**Bentz, D.P., Geiker, M.R., Hansen, K.K., 2001** “Shrinkage-Reducing Admixtures and Early-Age Desiccation in Cement Pastes and Mortars”, *Cement and Concrete Research*, No. 31, pp. 1075-1085.

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

**Bloom, R., and Bentur, A., 1992** “Free and restrained shrinkage of normal and high strength concretes”, *ACI Materials Journal*, 92, 211-217.

**Brad Pease, Hardik Shah ve Jason Weiss, 2005** “Shrinkage Behavior and Residual Stress Development in Mortar Containing Shrinkage Reducing Admixtures (SRA’s)” *ACI Materials Journal*, Special Publication, 227, 285-302.

**Bruno D’Souza, 2005** “Shrinkage Reducing Admixtures”, Admixture Systems Degussa Construction Chemicals Australia Pty Ltd İnternet sayfası, <http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Aditivos%20Reductores%20de%20Aguas/SHRINKAGE-REDUCING%20ADMIXTURES.pdf>

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

**Code, CEB-FIB Model., 1993** "CEB information report no. 213/214." *Comite Euro-International DuBeton*, Lausanne.

**Chandra, S., 1997** “Special Report, 10th International Congress on The Chemistry of Cement”, *Cement and Concrete Research*, 27, 10, 1613-1617.

**Davis, H.E., 1940** “Autogenous Volume change of Concrete. Proceedings of the 43rd Annual Meeting”, *American Society for Testing Materials*, Atlantic City, N.J.

**Deboodt, T., Fu, T., & Ideker, J. H., 2016** “Evaluation of FLWA and SRAs on autogenous deformation and long-term drying shrinkage of high performance concrete”, *Construction and Building Materials*, 119, 53-60.

**Ekaputri, J.J., Ishida, T. and Maekawa, K., 2011** “Autogenous Shrinkage of Mortars Made With Different Types of Slag Cement”, *JCI Annual Conference Technical paper*, 32(1), 353-358.

**Erdoğan, T.Y., 2003** “Beton”, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yayını*, Ankara

**Folliard, K. J., & Berke, N. S. 1997** “Properties of high-performance concrete”, *Cement and Concrete Research*, 1357-1364.

- Gagne, R., 2016** “Science and Technology of Concrete Admixtures”, Chapter 22.
- Gu, Y., Wei, Z., Ran, Q., Shu, X., Lv, K., & Liu, J., 2017** “Characterizing cement paste containing SRA modified nanoSiO<sub>2</sub> and evaluating its strength development and shrinkage behavior”, *Cement and Concrete Composites*, 75, 30-37.
- Han, N.; Walraven, J.C., 1995** “Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete at Early and Normal Ages”, *ACI Materials Journal*, 154, 73-94.
- Hearn, N., 1999** “Effect of shrinkage and load-induced cracking on water permeability of concrete”. *ACI materials journal*, 96, 234-241.
- Holt, E., & Leivo, M., 2004** “Cracking risks associated with early age shrinkage”, *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 521-530.
- Huo, X., & Wong, L. U., 2000** “Early-Age Shrinkage of HPC Decks Under Different Curing Methods”, *In Advanced Technology in Structural Engineering*, (pp. 1-11).
- Jennings, M. 1988** “Concrete surgery broadens its horizons”, *Civ. Engrg., London, England*, 11, 43-46.
- Kadioğlu, T., 2006** “Rötre Azaltıcı Katkı Maddeleri”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kamen, A., Denarié, E., Sadouki, H., and Brühwiler, E., 2008** “Thermo-mechanical response of UHPFRC at early age-Experimental study and numerical simulation”, *Cement and Concrete Research*, 38, 822–831.
- Lopez, M., Kahn, L.F., Kurtis, K.E., 2004** “Creep and shrinkage of high-performance lightweight concrete”, *ACI Materials Journal*, 101, 391-399.
- 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”, *Int. RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning (ConcreteLife'06)*, 1-11.
- Lynam, C.G., 1934** “Growth and Movement in Portland Cement Concrete”, *Oxford Univ. Press*, London, 26–27.
- Mardani-Aghabaglou, A., Yoğurtçu, E., Andiç, Ö., 2015** “Water Transport of Lightweight Concrete with Different Aggregate Saturation Levels”, *ACI Materials Journal*, 112, 681-692.

**Mardani-Aghabaglou, A., Yüksel, C., Hosseinnezhad, H., Ramyar, K., 2016** “Performance of steel micro fiber reinforced mortar mixtures containing plain, binary and ternary cementitious systems”, *Journal of Green Building*, 11(4), 109-130.

**Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M., 2006** “Concrete, Microstructure, Properties and Materials”, 3rd Edn., *McGraw-Hill*, USA.

**Mehta, P. K., & Monteiro, P., 1986** “Concrete: Structure, Properties and Materials”, Unpublished manuscript for revision of Mehta, *PK and Monteiro*, PJM Concrete: Structure, Properties, and Materials.

**Meyer, L. M., & Perenchio, W. F., 1979** “Theory of concrete slump loss as related to the use of chemical admixtures”, *Concrete International*, 1(01), 36-43.

**Mokarem., David W., 2002** “Development of Concrete Shrinkage Performance Specifications”, *Doctoral dissertation*, Virginia Tech.

**Neto, A.A.M., Cincotto, M.A. and Repette, W., 2008** “Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement”, *Cement and Concrete Research*, 38, 565–574.

**Neville, A.M., Adam M., 2000** “Propriétés des bétons”, Paris, *Éditions Eyrolles*, pp. 804

**Neville, A.M. and Brooks, 2010** “Concrete Technology”, Second Edition.

**Previte, R. W., 1977** “Concrete slump loss”, *In Journal Proceedings* (Vol. 74, No. 8, pp. 361-367).

**Polat, R., 2013** “Genleştirilmiş perlit agregası, nano ve mikro boyutta cao ve mgo ve kil’in yüksek mukavemetli betonların otojen rötreleri üzerindeki etkisi”, *Fen bilimleri enstitüsü*, Atatürk Üniversitesi.

**Powers, T.C., 1947** “A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete”, *Proc. Highw. Res. Board*, 27, 178– 188.

**Quangphu, N., Linhua, J., Jiaping, L., Qian, T., Tienquan, D., 2008** “Influence of Shrinkage-Reducing Admixture on Drying Shrinkage and mechanical Properties of High-Performance Concrete”, *Water Science and Engineering*, No. 1, pp. 67-74.

**Rajabipour, F., Sant, G., Weiss, J., 2008** “Interactions Between Shrinkage Reducing Admixtures (SRA) and Cement Paste's Pore Solution”, *Cement and Concrete Research*, No. 38, pp. 606-615.

**Rongbing, B. and Jian, S., 2005** “Synthesis and Evaluation of Shrinkage-Reducing Admixture for Cementitious Materials”, *Cement and Concrete Research*, No. 35, pp. 445-448.

**Ruacho, J.M., Gettu, R., Aguado, A., 2009** “Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on the Reduction of Plastic Shrinkage Cracking in Concrete”, *Cement and Concrete Research*, No. 39, pp. 141-146.

**Salem, R.M., 1996** “Strength and durability characteristics of recycled aggregate concrete”, PhD Thesis, *The University of Tennessee*, Knoxville.

**Saliba, J., Roziere, E., Grondin, F., Loukili, A., 2011** “Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Plastic and Long-Term Shrinkage”, *Cement and Concrete Composites*, No. 33, pp. 209-217.

**Samman, T. A., Mirza, W. H., & Wafa, F. F., 1996** “Plastic shrinkage cracking of normal and high-strength concrete: a comparative study”, *Materials Journal*, 93(1), 36-40.

**Sato, T., Goto, T., & Sakai, K., 1983** “Mechanism for reducing drying shrinkage of hardened cement by organic additives”, *CAJ Rev*, 5, 52-55.

**Soroushian, P., & Ravanbakhsh, S., 1998** “Control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fibers”, *Materials Journal*, 95(4), 429-435.

**Sun, Z., Xu, Q., 2009** “Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete”, *Materials Science and Engineering*.

**Tazawa, E., & Miyazawa, S., 1997** “Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials”, *Magazine of Concrete Research*, 49(178), 15-22.

**Termkhajornkit, P., Nawa, T., Nakai, M. and Saito, T., 2005** “Effect of fly ash on autogenous shrinkage”, *Cement and Concrete Research*, 35, 473-482.

**Tioua, T., Kriker, A., Barluenga, G., & Palomar, I., 2017** “Influence of date palm fiber and shrinkage reducing admixture on self-compacting concrete performance at early age in hot-dry environment” *Construction and Building Materials*, 154, 721-733.

**Topçu, İ.B., Canbaz, M., 2007** “Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash”, *Construction and Building Materials*, 21, 1486-1491.

**TS EN 197-1, 2012** Genel Çimentolar-Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *TSE*, Ankara.

**TS EN 1097-6, 2013** Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun Ve Su Emme Oranının Tayini, *TSE*, Ankara.

**TS EN 206, 2013** Beton- Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, *TSE*, Ankara.

**TS EN 12350-2, 2010** Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, *TSE*, Ankara.

**TS EN 12350-6, 2010** Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 6: Yoğunluk, *TSE*, Ankara.

**TS EN 197-1, 2012** Genel Çimentolar-Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *TSE*, Ankara.

**TS EN 1097-6, 2013** Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun Ve Su Emme Oranının Tayini, *TSE*, Ankara.

**TS EN 196-1, 2016** Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini, *TSE*, Ankara.

**TS EN 12390-3, 2010** Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, *TSE*, Ankara.

**Türker, T., 2000** “Betonarmede oluşan iç gerilmelere karşı gerçek önlem”, *İnşaat ve Malzeme*, 150, 24-25.

**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.

**Wang, J.Y., Banthia, N., Zhang, M.H., 2012** “Effect of Shrinkage Reducing Admixture on Flexural Behaviors of Fiber Reinforced Cementitious Composites”, *Cement and Concrete Composites*, No. 34, pp. 443-450.

**Wehbe, Y., Ghahremaninezhad, A., 2017** "Combined effect of shrinkage reducing admixtures (SRA) and superabsorbent polymers (SAP) on the autogenous shrinkage, hydration and properties of cementitious materials", *Construction and Building Materials*, 138, 151-162.

**Whiting, D., 1981** “Rapid determination of the chloride permeability of concrete”, *Final Report Portland Cement Association*, Skokie, IL. Construction Technology Labs.

**Yao, F., Müller, H. G., Clifford, A. J., Dueker, S. R., Follett, J., Lin, Y., Vogel, J. S. 2003** “Shrinkage estimation for functional principal component scores with application to the population kinetics of plasma folate”, *Biometrics*, 59(3), 676-685.

**Yoo, D.Y., Kang, A.T., Lee, J.H., Yoon, Y.S., 2013** “Effect of Shrinkage Reducing Admixture on Tensile and Flexural Behaviors of UHPFRC Considering Fiber Distribution Characteristics”, *Cement and Concrete Research*, No. 54, pp. 180-190.

**Yoo, D. Y., Ryu, G. S., Yuan, T., & Koh, K. T. 2017** “Mitigating shrinkage cracking in posttensioning grout using shrinkage-reducing admixture”, *Cement and Concrete Composites*, 81, 97-108.

**Yoo, S.W., Kwon, S. and Jungy, S.H., 2012** “Analysis technique for autogenous shrinkage in high performance concrete with mineral and chemical admixtures”, *Construction and Building Materials*, 34, 1–10.

**Zhang, M.H., Tam, C.T. and Leow, M.P., 2003** “Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete”, *Cement and Concrete Research*, 33, 10, 1687–94.

**Zhang, M-H., Li, L., Paramasivam, P., 2005** “Shrinkage of high-strength lightweight aggregate concrete exposed to dry environment”, *ACI MaterialsJournal*, 102, 86- 92.

**Zuo, W., Feng, P., Zhong, P., Tian, Q., Gao, N., Wang, Y., Miao, C., 2017** “Effects of novel polymer-type shrinkage-reducing admixture on early age autogenous deformation of cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, 100, 413-422.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Metin İLHAN  
Doğum Yeri ve Tarihi : Başkale/VAN  
Yabancı Dili : İngilizce, Arapça

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl) :  
Lise : Maltepe Askeri Lisesi- İzmir  
Lisans : Erzurum Atatürk Üniversitesi- İnşaat Müh.  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Özel bir şirkette şantiye şefi 2015 - Halen  
Çalışıyor

İletişim (e-posta) : metinilhan65@gmail.com