

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA RÖTRE AZALTICI KATKI
MADDESİNİN DAYANIM VE DAYANIKLILIĞA ETKİSİ

EMRAH TEKİN

MAYIS 2017

İnşaat Anabilim Dalında Emrah TEKİN tarafından hazırlanan KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA RÖTRE AZALTICI KATKI MADDESİNİN DAYANIM VE DAYANIKLILIĞA ETKİSİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali Payidar AKGÜNGÖR

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. İlhami DEMİR

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ _____

Üye (Danışman) : Prof. Dr. İlhami DEMİR _____

Üye : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA RÖTRE AZALTICI KATKI MADDESİNİN DAYANIM VE DAYANIKLILIĞA ETKİSİ

TEKİN, Emrah

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İlhami DEMİR

Mayıs 2017, 162 sayfa

Bu çalışmada, son yıllarda kullanım alanı gittikçe yaygınlaşan fakat henüz istenilen seviyeye gelmeyen, ileride geleneksel betonun yerini alması beklenen, özel bir beton türü olan Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda(KYB), rötre azaltıcı katkı maddesi (SRA)'nın dayanım ve dayanıklılığa olan etkisi incelenmiştir. % 0,95 oranında polikarboksilat katkılı süperakışkanlaştırıcı kullanılarak elde edilen kontrol KYB ve optimum SRA dozajı belirlenerek SRA katkılı KYB numuneler üretilmiştir. Kontrol KYB ve SRA katkılı KYB numunelerin taze halde işlenebilme özellikleri, su kürü ve 28 günlük su kürünün akabinde, % 10 oranında Na_2SO_4 çözeltisinde, sertleşmiş halde dayanım ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. SRA'nın betonun mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği, özellikle erken yaşlarda bunun daha belirgin olduğu görülmüştür. SRA katkısının, taze beton özelliklerini çok belirgin biçimde olmasa da etkilediği görülmüştür. SRA içeren numunelerin, kontrol numunelere kıyasla, kuruma rötresi değerlerini 7.günde yaklaşık % 40, 180. günde yaklaşık %27 oranında azalttığı görülmüştür. SRA'nın özellikle erken yaş kuruma rötrelere üzerinde daha etkili olduğu bulgusu elde edilmiştir. Kısıtlanmış rötre deneylerinde SRA katkısının kontrol numuneye göre, çatlama yaşını geciktirdiği ve 90.gün sonunda çatlak genişliğini yaklaşık %30 azalttığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Kendiliğinden Yerleşen Betonlar, Rötre Azaltıcı Katkı Maddesi, Dayanım, Dayanıklılık

ABSTRACT

THE EFFECT OF SHRINKAGE REDUCING ADMIXTURE ON THE STRENGTH AND DURABILITY OF SELF COMPACTING CONCRETE

TEKİN, Emrah

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İlhami DEMİR

May 2017, 162 pages

In this study, the effect of Shrinkage Reducing Admixture (SRA) on the strength and durability of Self Compacting Concrete (SCC), which is a special type of concrete that is expected to replace conventional concrete in the future and has become widespread in recent years but not at the desired level, is examined. SCC samples with SRA were produced by determining the control SCC by using superplasticizer with %0,95 polycarboxylate admixture and optimal SRA dosage. Fresh workability properties of control SCC and SCC with SRA in normal water curing and after 28 days of curing; strength and durability properties of hardened concrete specimens which were exposed to %10 Na₂SO₄ solution, were examined. It has been found that SRA affects the mechanical properties of concrete negatively, especially in early ages. It can be said that SRA has a slight effect on fresh concrete properties. Samples containing SRA reduced drying shrinkage values by about %40 on 7th day and %27 on 180th day. It is obtained that SRA is more effective especially on early age shrinkage. In the restricted shrinkage tests, the SRA admixture delayed the cracking age according to the control sample and it was observed that the crack width was reduced by about 30% at the end of 90 days.

Keywords : Self Compacting Concretes, Shrinkage Reducing Admixture, Strength, Durability

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesi sürecinde bilgi, birikim, deneyim ve desteğini esirgemeyen, değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İlhami DEMİR'e, yardım ve katkılarından dolayı Araştırma Görevlisi Özer SEVİM'e, BAP 2016/72 nolu bilimsel araştırma projesi kapsamında tezime destekleri için Kırıkkale Üniversitesi'ne, eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme, çalışmalarım sırasında yardımları ve gösterdikleri kolaylıklar için Kırıkkale Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü'nde çalışan iş arkadaşlarım ve yöneticilere, beton dökümlerini gerçekleştirirken yardımcı olan Sigma Beton Laboratuvar Hizmetleri ve Ticaret Limited Şirketi çalışanlarına ve son olarak tez çalışmam sırasında hayatını kaybeden ve üzerimizde emeği bulunan sevgili aile büyüğümüz, anneannem Sultan POLAT'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması.....	3
1.2. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	6
2. GENEL BİLGİLER	8
2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonlar ve Tarihsel Gelişimi	8
2.2. KYB’lerin Kullanım Alanları	12
2.3. KYB’lerin Avantaj ve Dezavantajları.....	13
2.4. KYB’lerin Tasarım Dizaynı	17
2.5. KYB Karışımlarında Kullanılan Malzemeler	24
2.5.1. Çimento	25
2.5.2. Agregası.....	25
2.5.3. Toz Malzeme	26
2.5.4. Akışkanlaştırıcı Katkı	27
2.6. Taze Haldeki KYB Özellikleri.....	30
2.6.1. Doldurma Yeteneği	32
2.6.2. Ayırmaya Karşı Direnç.....	32
2.6.3. Geçme Yeteneği	33
2.6.4. Taze Haldeki KYB ile İlgili Deney Yöntemleri	34
2.6.4.1. Çökme Yayılma ve T500 Süresi Deneyi	35
2.6.4.2. V Hunisi Deneyi	36
2.6.4.3. L kutusu Deneyi	37
2.7 Sertleşmiş Haldeki KYB ve Özellikleri	38
2.7.1. Basınç Dayanımı	38

2.7.2. Eğilme Dayanımı	39
2.7.3. Schmidt Yüzey Sertliği	40
2.8. Dayanıklılık (Durabilite).....	42
2.8.1. Sülfat Etkisi.....	46
2.8.2. Islanma-Kuruma.....	51
2.8.3. Kılcallık.....	52
2.9. Rötire	53
2.9.1. Plastik Rötire	58
2.9.2. Otojen Rötire	60
2.9.3. Kuruma Rötresi	61
2.9.4. Karbonatlaşma Rötresi	64
2.9.5. Negatif Rötire (Şişme)	65
2.9.6. Rötreye Etki Eden Parametreler	66
2.9.7. Rötire Çatlakları	70
2.9.8. Kısıtlanmış Rötire	73
2.9.9. Rötire Azaltıcı Katkı Maddeleri (SRA)	75
3. MALZEME VE METOT	81
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	81
3.1.1. Çimento	81
3.1.2. Agregat	81
3.1.3. Su	87
3.1.4. Akışkanlaştırıcı Katkı	87
3.1.5. Rötire Azaltıcı Katkı	89
3.1.6. Sodyum Sülfat (Na_2SO_4)	90
3.2. Metot	91
3.2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması	91
3.2.2. Taze Beton Deneyleri	95
3.2.2.1. Çökme-Yayılma Deneyi	95
3.2.2.2. V Hunisi Deneyi.....	96
3.2.2.3. L Kutusu Deneyi	97
3.2.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	98
3.2.3.1. Basınç Dayanımı Tayini	98
3.2.3.2. Eğilme Dayanımı Tayini	101

3.2.3.3. Schmidt Çekici Deneyi	101
3.2.4. Rötire Deneyleri	102
3.2.4.1. Negatif Rötire (Şişme) Deneyi	105
3.2.4.2. Kuruma Rötresi Deneyi	106
3.2.4.3. Islanma-Kuruma ve Sülfat Direnci Deneyi.....	107
3.2.4.4. Kısıtlanmış Rötire Deneyi	108
3.2.5. Kılcal Su Emme Deneyi.....	110
3.2.6. SEM Analizi.....	112
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	113
4.1. Taze Beton Özellikleri	113
4.1.1. Çökme-Yayılma ve T500 Deneyi Sonuçları	113
4.1.2. V hunisi Deneyi Sonuçları	114
4.1.3. L kutusu Deneyi Sonuçları	115
4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	116
4.2.1. Basınç Dayanım Deneyleri	116
4.2.1.1. 2 Günlük Basınç Dayanım Deneyi Verileri	116
4.2.1.2. Su Küründe Bekletilen Numunelerin Basınç Dayanım Verileri	117
4.2.1.3. Na ₂ SO ₄ Küründe İKÇ Basınç Dayanım Verileri	119
4.2.1.4. Karşılaştırmalı Basınç Deneyi Grafiklerinin Analizi.....	121
4.2.2. Eğilme Dayanım Deneyleri.....	123
4.2.2.1. Su Küründe Bekletilen Numunelerin Eğilme Dayanım Verileri	123
4.2.2.2. Na ₂ SO ₄ Küründe İKÇ Eğilme Dayanım Verileri.....	125
4.2.2.3. Karşılaştırmalı Eğilme Deneyi Grafiklerinin Analizi	127
4.2.3. Schmidt Çekici Deney Verileri	128
4.3. Rötire Deneyleri Sonuçları	130
4.3.1. Negatif Rötire Deneyi Verileri.....	131
4.3.2. Kuruma Rötresi Deneyi Verileri	133
4.3.3. Islanma-Kuruma ve Sülfat Direnci Deneyi Verileri	136
4.3.4. Kısıtlanmış Rötire Deneyi Verileri	138
4.4. Kılcal Su Emme Deneyi Verileri	140
4.5. Mikroyapı Analizi Sonuçları	142
4.6. Fiziksel Değişimlerin Gözlenmesi	147
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	149

5.1. Sonuçlar	149
5.2. neriler	151
KAYNAKLAR	152



ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE	Sayfa
2.1. Japonya’da kullanılan KYB karışım dizaynı metotları	19
2.2. KYB karışım kompozisyonun ağırlık ve hacimce tipik aralığı.....	22
2.3. Mineral katkı tipleri	27
2.4. KYB’nin işlenebilirlik özellikleri için test yöntemlerinin listesi	31
2.5. KYB’nin özellikleri için uygunluk kriterleri.....	34
2.6. ACI 201’e göre sülfat etkisi açısından sınıflama	47
2.7. TS 3440’a göre sülfat iyonlarının zararlı etkinlik sınıflamaları.....	47
3.1. Karışımlarda kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri	81
3.2. Metilen mavisi deney sonuçları	82
3.3. Çok ince malzeme muhtevası deneyi sonuçları	82
3.4. Tane yoğunluğu ve su emme oranı tayini deney sonuçları	83
3.5. 0-4 mm agrega elek analizi sonuçları.....	84
3.6. 4-11,2 mm agrega elek analizi sonuçları.....	85
3.7. Karışımda kullanılan SA’nın kimyasal özellikleri.....	88
3.8. SRA-50 katkısının kimyasal özellikleri	89
3.9. Na ₂ SO ₄ ‘ün kimyasal özellikleri.....	90
3.10. Karışımların kodlandırma şeması	92
3.11. KYB karışımlarına ait özellikler (1 m ³ için)	93
4.1. Çökme-yayılma ve T500 deneyi sonuçları	113
4.2. V hunisi deneyi sonuçları.....	115
4.3. L kutusu deneyi sonuçları	115
4.4. 2 günlük basınç deneyi sonuçları	117
4.5. Su küründe bekletilen numunelerin basınç deneyi sonuçları.....	118
4.6. Na ₂ SO ₄ küründe IKÇ uygulanan numunelerin basınç deneyi sonuçları.....	120
4.7. Su küründe bekletilen numunelerin eğilme deneyi sonuçları	124
4.8. Na ₂ SO ₄ küründe IKÇ uygulanan numunelerin eğilme deneyi sonuçları	126
4.9. Schmidt Çekici Deneyi R Okumaları.....	129
4.10. Negatif rötre deneyi sonuçları	131
4.11. Kuruma rötresi deneyi sonuçları	134

4.12. Islanma-Kuruma ve Sulfat Direnci Deneyi Sonuçları	136
4.13. Kısıtlanmış Rötre Deneyi Sonuçları.....	138
4.14. Kılcallık Deneyi Sonuçları	141



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. KYB'den üretilmiş bir prekast kolon.....	12
2.2. KYB'nin şematik bileşimi.....	17
2.3. Kendiliğinden yerleşmenin çalışma mekanizması.....	21
2.4. Geleneksel beton ve KYB'nin malzeme hacmi karşılaştırması.....	23
2.5. KYB tasarım akış şeması grafiği	24
2.6. Akışkanlaştırıcı katkıların kimyasal formları	28
2.7. Akışkanlaştırıcı katkıların elektrostatik ve sterik etkisi.....	29
2.8. KYB'da çökme-yayılma deneyi aparatları.....	35
2.9. V hunisi deneyi aparatları	36
2.10. L kutusu deneyi aparatları.....	37
2.11. 3 noktalı eğilme deneyi	40
2.12. Schmidt çekici ve uygulama yönüne göre değişen fck ile geri tepme sayısı arasında korelasyonu gösteren bir grafik.....	41
2.13. Beton veya betonarme yapıların iç ve dış etmenlerle bozulması.....	43
2.14. Yapı performansının zaman içerisinde değişimi.....	44
2.15. Silis dumanın çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi.....	45
2.16. Sülfat direnci ile betonun geçirimsizliği arasındaki ilişki zinciri.....	48
2.17. Sülfatın betonla teması.....	49
2.18. Toplam şekil değiştirme.....	54
2.19. Toplam büzülmenin yönetim mekanizmaları.....	57
2.20. ASTM C157'ye göre serbest rötrenin ölçümü	57
2.21. Farklı büzülme türlerinin göreceli büyüklükleri.....	58
2.22. Plastik rötre çatlaklarının formasyonu	59
2.23. Otojen büzülme ve kimyasal büzülme arasındaki ilişki.....	61
2.24. Kuruma rötresine etki eden faktörler	62
2.25. Islanma-kuruma çevrimleri ve rötre ilişkisi	64
2.26. s/ç, çimento ve su içeriğinin uzun süreli büzülme üzerine etkisi.....	68
2.27. Agrega hacimsel içeriğinin beton kuruma büzülmesine etkisi	69
2.28. Köprü ayaklarında oluşan kuruma rötresi çatlakları).....	72

2.29. Gerilim gelişimine genel bir bakış	72
2.30. Sürfaktan molekülünün şematik taslağı	76
2.31. Menisk oluşumunun illüstrasyonu	79
2.32. SRA'nın gözeneklilik üzerindeki etkisi	80
3.1. 0-4 mm agrega gradasyon grafiği	86
3.2. 4-11,2 mm agrega gradasyon grafiği	86
3.3. Karışımlarda kullanılan agrega stoğu.....	87
3.4. KYB karışımlarında kullanılan SA katkı	88
3.5. KYB karışımlarında kullanılan rötre azaltıcı katkı	89
3.6. Karışımları hazırlamada kullanılan beton karışım mikseri	92
3.7. Basınç, eğilme ve rötre deneylerinde kullanılan kalıplar.....	94
3.8. Çökme-yayılma deneyi ve yayılma çapının ölçülmesi	96
3.9. V hunisi deneyi yapılışı.....	97
3.10. L kutusu deneyi yapılışı	98
3.11. Hidrolik beton pres makinası	99
3.12. Su küründe bekletilen KYB numuneleri	100
3.13. Schmidt test çekici uygulaması.....	102
3.14. 100*100*500 mm boyutlarında pimli prizmatik kiriş numunesi kalıbı.....	104
3.15. Dijital boy ölçüm cihazı	104
3.16. Dijital boy ölçüm cihazında ölçüm yapılması.....	105
3.17. Kuruma rötresi deneyi için hazırlanmış numune	106
3.18. Islanma-kuruma ve sülfat direnci deneyinin yapılışı	107
3.19. Kısıtlanmış rötre halka kalıbın kesiti	109
3.20. Halka deneyi uygulama aşaması	110
3.21. Kılcal su emme deneyi düzeneği.....	111
3.22. Kılcal su emme deneyi yapılışı	112
4.1. Su küründe bekletilen numunelerin basınç deney grafiği	118
4.2. Na ₂ SO ₄ küründe IKÇ uygulanan numunelerin basınç deney grafikleri.....	120
4.3. Numunelerin karşılaştırmalı basınç dayanım grafiği	122
4.4. Su küründe bekletilen numunelerin eğilme dayanım grafiği	124
4.5. Na ₂ SO ₄ küründe IKÇ uygulanan numunelerin eğilme deneyi grafikleri...	126
4.6. Numunelerin karşılaştırmalı eğilme dayanım grafiği	127
4.7. Schmidt çekici deneyi grafiği	130

4.8. Negatif rötre deneyi grafiği	133
4.9. Kuruma rötresi deney grafiği	135
4.10. Sülfat küründe İKÇ sonucu boy değişim grafiği.....	137
4.11. Kısıtlanmış rötre çatlağı genişliğinin zamana bağlı gelişimi	140
4.12. Kılcallık deneyi grafiği	142
4.13. Su küründe bekletilen KYB0 numunesine ait SEM görüntüleri.....	143
4.14. Su küründe bekletilen KYB1 numunesine ait SEM görüntüleri.....	144
4.15. Na ₂ SO ₄ küründe İKÇ uygulanan KYB0 numunesine ait SEM görüntüleri	145
4.16. Na ₂ SO ₄ küründe İKÇ uygulanan KYB1 numunesine ait SEM görüntüleri	146
4.17. KYB0 ve KYB1 numunelerinin 1 günlük görüntüleri.....	147
4.18. İKÇ çevrimine maruz kalmış numune	148
4.19. 180 gün sülfat çözeltisinde İKÇ'ne maruz bırakılan numuneler	148

SİMGELER DİZİNİ

ΔL_x	Yüzde boy değişimi
L _{ilk}	Numunenin ilk ölçülen boy uzunluğu
L _{son}	Numunenin son ölçülen boy uzunluğu
γ	Yüzey gerilimi
Q	Emilen su miktarı
k	Kılcallık katsayısı
t	Zaman

KISALTMALAR DİZİNİ

KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
SRA	Rötre Azaltıcı Katkı
SA	Süperakışkanlaştırıcı Katkı Maddesi
Na ₂ SO ₄	Sodyum Sülfat
CSH	Kalsiyum silikat hidrat
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
ASTM	Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
T500	Betonun 500 mm çapa yayılma süresi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
İKÇ	Islanma-Kuruma Çevrimi

1.GİRİŞ

Beton, insanlık tarihi boyunca en çok kullanılan yapı malzemesidir. Kişi başına düşen beton kullanım miktarı, birçok temel besin maddesinin kişi başına kullanım miktarını geçmiş bulunmaktadır. Diğer yapı malzemelerinden çok kullanılmasının nedenleri; ekonomik olması, ihtiyaç halinde şantiye ortamında bile kolay üretililecek ve hazır beton tesislerinden kolay ulaşılabilecek, istenilen formun kolayca verilebilecek bir yapı malzemesi olmasındandır. Bu kadar yaygın olarak kullanılan beton üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar ve deneyler de gün geçtikçe doğal olarak artarak devam etmektedir. Karayollarında, tünellerde, barajlarda, havaalanlarında, köprülerde, üst yapılarda, sanat yapılarında vb. yaşama ait nerdeyse tüm alanlarda kullanılmakta ve betondan herkes kendi sektörüne göre farklı bir özellik beklemektedir. Bu farklı özellikler de betonun ana ham maddesini oluşturan çimento, su, agregadan farklı olarak mineral katkıları, kimyasal katkıları, çelik, cam ve polipropilen liflerin ilave edilmesiyle sağlanmaktadır.

Beton teknolojisine yeni bir düzey getiren süper ve hiperakışkanlaştırıcılar sayesinde yüksek performanslı beton üretimi gerçekleştirilmiştir. İşlenebilirlik ve dayanım çıkmazı bu katkıları sayesinde aşılmıştır. 1980'li yıllarda süper akışkanlaştırıcı katkıları arasına polikarboksilat esaslı katkıların eklenmesiyle, daha yüksek dayanımlı, akıcı ve kendiliğinden yerleşen betonların üretilmesi sağlanmıştır [1].

Betonlarda dayanım ve dayanıklılık sorunlarını çözmek için Tokyo Üniversitesi'nde Okamura tarafından bir proje çalışması başlatılmıştır. Bu çalışmanın sonunda beton yapıların bozulmasının en sık nedeni, yetersiz sıkıştırma olarak belirlenmiştir. Okamura, bu sıkıştırma problemini ortadan kaldırmak için taze karışımın, akışkanlık artışı önermiştir. Kendiliğinden yerleşen beton kavramı da ilk olarak 1988 yılında Okamura tarafından sistematize edildi ve başlangıçta yüksek performanslı beton olarak adlandırılmıştır [2]. Aynı zamanda şimdi yüksek performanslı beton olarak bilinen şeyin üretilmesi nedeniyle, ismini "kendi kendini sıkıştıran yüksek performanslı beton" olarak değiştirmiştir.

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), donatı aralığı sık ve kesit genişlikleri derin olan kalıplara, kendi ağırlığı ile sıkıştırma enerjisine gerek kalmadan yerleşen, aynı anda bu kriterleri sağlarken ayrışma, kuma gibi problemler yaratmayan özel bir betondur [3].

Günümüzde basınç dayanımı, betonlar tarif edilirken en önemli parametrelerin başında gelmektedir. KYB'lar da içerdiği düşük su/çimento oranı ile yüksek dayanımlı beton sınıfları arasında kendisine yer edinmiştir. KYB'lar yüksek performans ve yüksek dayanıma ulaşmak için daha fazla oranda ince malzeme içermesi, su/çimento oranının düşük tutulması nedeniyle geleneksel(konvaksiyonel) betona göre daha fazla rötre problemi ile karşı karşıya gelmektedir. Bundan dolayı, büzülmeyi sınırlama KYB için büyük önem taşır. Rötreyi, betondaki su kaybı nedeniyle betonda meydana gelen hacimsel değişiklik veya daha genel bir tanım olarak betonda büzülme olarak tarif edebiliriz. Rötreye betonda birçok istenmeyen duruma neden olur. Betonun basınç dayanımını azalttığı gibi betonda yüzeysel ve derin çatlaklara neden olur. Betonu hem statik açıdan, hem de mimari açıdan etkileyerek, yapının ekonomik ömrü üzerinde belirleyici bir etkisi vardır. Betonda rötre tam anlamıyla önlenemez, ancak en aza indirilebilir. Beton için gerekli önlemler alındığında, çatlamanın oluşumu önemli ölçüde azaltılacaktır. Büzülme çatlaklarının etkisini sınırlayacak bir KYB karışımı tasarlanabilirse, betonun rötre ve çatlama problemlerinde yardımcı olacaktır. Betonun tasarımı, kür ve bakım koşulları, kullanılan kimyasal ve mineral katkıları, çimento seçimi, rötre kontrolü üzerinde etkili olan parametrelerdir. Betonda rötreyi azaltmak için çeşitli teknikler önerilmiştir. Su içeriğini azaltmak, agrega sertliğini ve içeriğini arttırmak için karışım tasarımının optimizasyonu, buharlaşmayı azaltmak veya kürlemek için ek su temin etmek gibi iyileştirilmiş kür uygulamaları bu yöntemler arasında sayılabilir. Ayrıca büzülme derzleri kullanmak ve genleşen çimento ve kimyasal katkıları kullanmak rötreyi azaltmak için bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Rötreyi Azaltıcı Katkı Maddesi(SRA)'de, rötre kontrolünde kullanılan kimyasal katkılardandır. SRA'lar düşük viskoziteye sahip olmaları ve yüzey gerilmelerini azaltmaları nedeniyle önemli derecede rötre düzenlemede olumlu etki eder. Bunun yanında boşluk yapısı üzerinde etkisi nedeniyle çimento hidratasyonunu yavaşlatarak, betonun dayanımı üzerinde olumsuz etkiye neden olmaktadır [4].

1.1. Literatür Taraması

Berke vd. (1997), beton karışımları üzerinde testler yaptığı çalışmada; Numuneler 23 C°, % 50 bağıl nemde muhafaza edilmiştir. SRA'nın kullanılması, yüksek performanslı betonun (hem silika dumanlı hem de silisli duman içermeyen) kuruma büzülmesini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu büzülme azalmasının, SRA'nın silika dumanı ile birlikte kullanıldığında daha belirgin olduğu görülmüştür. SRA içermeyen silika dumanlı betona kıyasla, 28 günde kuruma büzülmesinde %52 azalma ve 120 gün sonra kuruma büzülmesinde %43 azalma olarak yansıtıldı. Karşılaştırma için, kontrol betonuna SRA ilavesi, 28 günde %35, 120 günde % 29 oranında bir büzülme azalması sağlamıştır. Bu çalışmada kürlenme ile ilgili de araştırmalar yapılmış olup, SRA'ların zayıf şekilde kürlenmiş betonun büzülmesini azaltmak için etkili bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte rötre azaltıcı katkılardan maksimum fayda elde etmek için ilave nemle sertleştirme önerilmiştir. SRA içeren beton, SRA içermeyen karışımlarına göre daha düşük erken dayanım sergilemiş ve bu dayanım kaybı, SRA ilavesinin su azaltıcı eğiliminden dolayı karıştırma suyunu azaltarak bir dereceye kadar dengelenebileceği fikri ortaya konulmuştur [5].

Uysal (2010), yaptığı çalışmanın bir aşamasında, farklı karışımlardaki KYB deney numunelerinin 400 gün boyunca % 10 NaSO₄ içinde bekletilmesi sonucunda basınç ve ağırlıklarında ki değişim oranı, aynı süre zarfında normal suda kür edilen numunelerle karşılaştırıldığında %1,52 ile %9,68 arasında basınç dayanım kaybına uğradıklarını tespit etmiştir. Numuneler arasında en fazla basınç kaybına uğrayan şahit beton olurken, en az basınç dayanım kaybı YFC ikameli KYB'lerde gerçekleşmiştir. Mineral maddelerinin kullanım oranlarının da sülfat direnci üzerindeki etkisi araştırılmış ve düşük ikameli KYB numunelerinin sülfat direnci şahit betonla benzer özellikler göstermiştir. Aynı numuneler bu sefer 400 gün boyunca % 10 MgSO₄ içinde bekletilmiş bu sefer basınç dayanım kayıpları % 4,55 ile % 13,09 olarak ölçülmüş ve yine en iyi dayanımı YFC ikameli KYB'ler göstermiştir. MgSO₄ içinde bekletilen numunelerin basınç dayanım kaybı, NaSO₄ içinde bekletilen numunelere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir [6].

Nguyen Quangphu vd. (2008), mukavemet ve dayanıklılık açısından geleneksel beton üzerinde spesifik performans avantajlarına sahip olan yüksek performanslı beton (HPC)'de, SRA kullanılmasının, taze beton özellikleri, basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastik modülü gibi mekanik özelliklerine olan etkilerini değerlendirmiştir. İki farklı s/ç oranına sahip (0.22 ve 0.40) ve (SRA =% 0,% 1,% 2 ve % 4) oranlarında farklı SRA dozajlarına sahip numuneler hazırlanmıştır. 0,40 s/ç oranına sahip numunelerde karışım için % 25 uçucu kül (FA) ve % 25 cüruf, 0.22 s/ç oranına sahip numunelerde % 15 silika dumanı(SF)ve % 25 uçucu kül (FA) kullanılmıştır. Deneyler 24 adet prizmatik numune kullanılmış ve rötre ölçümleri 120 günlük kuruma sonunda yapılmıştır. Betonun basınç dayanımı, yarıma gerilimi mukavemeti ve elastik modülündeki azalmalar SRA'sız beton karışımlarına kıyasla 90 gün sonra sırasıyla %7-%24, %9 -%19 ve %5-%12 aralığında bulunmuştur. SRA ayrıca betonun kuruma büzülmesini azaltmaya yardımcı olduğu, SRA'nın SF ve FA (s/ç= 0.22) ile birlikte kullanıldığında büzülme azalması daha belirgin olduğu, SRA ilavesinin çökme oranında bir artışa neden olduğundan, betonun işlenebilirliğinde artışlar gözlemlendiği, ayrıca SRA'nın erken yaş büzülmesini azaltmada en etkili olduğu belirtilmiştir [7].

Ulukaya (2008), yaptığı çalışmada, 2 farklı KYB numunesi kullanmıştır. Numunelerin biri uçucu kül katkılı, diğeri bağlayıcı olarak yalnızca çimento kullanılarak üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde yapılan taze beton deneyleri sonucun birbirine benzer özellikler gösterdiği görülmüştür. Mekanik özellikler karşılaştırıldığında ise basınç dayanımları, yarmada çekme dayanımları birbirine yakın sonuçlar vermiş. Elastite modüllerinin de yaklaşık eşit olduğu tespit edilmiştir. Uçucu kül katkılı betonların bütün rötre değerleri, katkısız betona göre fazla çıkmıştır. Kısıtlanmış rötre deneyleri sonuçlarında yine katkılı KYB'lerin çatlak genişlikleri, diğere rötre değerleriyle ilişkin olarak katkısız betonlara göre daha geniş olduğu tespit edilmiştir [8].

Pehlivan (2008), yaptığı çalışmada, C20 normal beton, SA katkılı C40 beton ve silis duman katkılı C40 beton numuneler üretmiş ve betonun rötresi üzerine bir takım deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu çalışma sonucunda rötrenin en çok beton döküldükten sonraki 48 saat içinde meydana geldiği, daha sonra giderek azaldığı ve

sıfıra yaklaştığı bulgusuna ulaşmıştır. Ağırlık kaybı deney sonuçlarında C20 beton numunelerinde %2,41, SA katkılı numunelerde %0,81, SD katkılı numunelerde ise %1,53 olarak tespit edilmiştir. Betonda kullanılan su miktarının rötreyi önemli ölçüde etkilediği, su miktarı fazla olan numunelerin diğer numunelere oranla daha fazla rötreye yaptığı gözlenmiştir [9].

Saliba vd. (2010), çalışmalarında SRA'nın plastik rötreye, uzun süreli rötreye, mekanik özellikler ve beton gözenek yapısı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Beton numuneleri, normal ve yüksek mukavemetli betonun tasarımı için iki farklı s/ç oranında hazırlanmıştır. Rötreye azaltıcı katkı maddesinin oranı, diğer parametreler sabit tutulurken bağlayıcının toplam kütlesine % 1 eklenerek çalışılmıştır. Erken yaşta sonuçlar, SRA'nın, s/ç oranı 0,65 olan numunelerde, s/ç oranı 0.43 olan numunelere kıyasla plastik çekmeyi % 25 azalttığını bulmuşlardır. Sertleşmiş betonda ise 1 günden itibaren kuruma büzülmesi değerlendirilmiştir. SRA'nın, s/ç= 0.65 ve s/ç = 0.43 beton karışımları için 7 günlük kuruma büzülmesini, sırasıyla %56-%31'e kadar ve 70 günlük kuruma büzülmesini %33 - %25 oranında azalttığı, SRA'nın erken yaşlarda kuruma büzülmesini azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda, iç bağıl nemin yüksek olduğunda veya malzemede daha yüksek gözenekliliğe olduğunda SRA'nın daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır [10].

Kadioğlu (2006), yaptığı çalışmada, 2 farklı SRA katkısı kullanarak farklı s/ç oranlarında numuneler üretmiş, bunları katkısız numunelerle karşılaştırarak SRA'nın etkilerini incelemiştir. SRA'ların etkisinde s/ç oranının etkili olduğu, s/ç oranının yüksek olduğu numunelerde rötreyi daha fazla oranda azalttığı tespit edilmiştir. SRA kullanılan numunelerde daha fazla basınç dayanım kaybı gözlenmiştir. Beton kürünün basınç dayanımında etkili olduğu, kür uygulanmayan numunelerde SRA katkısının daha fazla basınç dayanımına sebep olduğu görülmüştür. Harç numunelerinin boy değişiminin, beton numunelerin boy değişimi ile kıyaslandığında s/ç oranına bağlı olarak, düşük s/ç oranında 3 kat fazla, yüksek s/ç oranında 4 kat daha fazla birim deformasyon gözlenmiştir. Farklı kimyasal yapıda SRA'ların da rötreyi ve ağırlık değişimini farklı oranlarda etkilediği tespit edilmiştir [11].

Shah vd. (1992), yaptığı çalışmada, betonun büzülme çatlamasıyla ilgili 3 farklı türde SRA kullanmışlardır. İlki alkoksillenmiş alkol içeren, ikincisi alkoksillenmiş tabanlı oligomer, üçüncüsü ise geçici alkol bazlı bir malzemedir. Numuneler üzerinde serbest ve kısıtlanmış rötre deneyleri gerçekleştirilmiştir. SRA içeren beton karışımlar, çelik, elyaf ve polipropilen fiber içeren karışımlarla karşılaştırılmıştır. Ağırlık kayıp deneyleri ve gözenek boyut dağılımı ve taze betonların akış deneyleri yapılmıştır. SRA eklenmesi serbest rötrenin azalmasına neden olmuştur. SRA'nın kısıtlanmış rötre deneylerinde önemli bir etkisi görülmüş olup, çatlak genişliklerinin azalmasına neden olurken, çatlak oluşum yaşını da uzattığı görülmüştür. SRA eklenmesi basınç dayanımında olumsuz bir etkiye neden olmuştur. Ortam koşullarının değişmesi, SRA tipinin ve dozajının, kür süresinin değişimine bağlı olarak daha fazla SRA kullanılması, serbest rötrede daha fazla azalmaya neden olurken aynı zamanda, basınç dayanımında da daha fazla kayıplara neden olduğu tespit edilmiştir [12].

Dhiyaneshwaran vd.(2013), yaptığı çalışmada, VMA (Viskozite Düzenleyici katkı) ve F sınıfı uçucu kül ile KYB numuneler tasarlamıştır. %10,%20,%30,%40 oranlarında kül, süperakışkanlaştırıcı ve VMA kullanmışlardır. Deneylerinde 0,45 s/ç oranını kullanmışlardır. T50, V hunisi, L kutusu ve U kutusu taze beton deneyleri ve beton dayanıklılığı için asit direnci, sülfat saldırısı ve doymuş su emme ağırlıkları deneyleri 28 56 ve 90. günler için yapılmıştır. Akışkanlaştırıcı katkı maddesi dozajının taze beton özellikleri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. %30 oranında uçucu küle sahip numunelerin diğerleriyle karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar verdiği, sodyum sülfat çözeltileri içinde numunelerde ağırlık kayıpları ve uçucu kül oranı arttıkça ağırlık kaybı oranlarının azaldığı görülmüştür. Asit direncine karşı koymada ise VMA katkılı numunelerin daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır [13].

1.2. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

1996'dan 2010 yılına kadar hazır betonların kullanım istatistiklerine bakıldığında C30/37 ve üzeri basınç dayanımına sahip betonların sektörde kullanım oranı % 0,6 dan, % 39,3 seviyelerine geldiği görülmüştür [15]. Kendiliğinden Yerleşen Betonlar

da (KYB), yüksek dayanımlı beton sınıfları arasında kendine yer edinmiştir. Bu çalışmada Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda, Rötire Azaltıcı Katkı Maddesinin dayanım ve dayanıklılığa olan etkisi incelenmiştir. % 0,95 oranında polikarboksilat katkılı süperakışkanlaştırıcı kullanılarak kontrol KYB ve % 1 SRA katkılı KYB numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde taze ve sertleşmiş beton üzerinde deneyler yapılmıştır. Taze beton deneyleri olarak Çökme yayılma ve T 500 deneyleri, V hunisi deneyi, L kutusu deneyi, mekanik olarak basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneylerin yanında Schmidt Çekici ile yüzey sertliği deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda rötire, kısıtlanmış rötire, kılcallık, ve fiziksel özelliklerin değişimi gözlenmiştir. Yapılmış deney sonuçları birbirleri ile mukayese edilerek Rötire Azaltıcı Katkı Maddelerinin Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda dayanım ve dayanıklılığa etkileri incelenmiştir.

2.GENEL BİLGİLER

2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonlar ve Tarihsel Gelişimi

20. yüzyılda teknolojinin de gelişimiyle beton üzerinde çalışmalar hızla artarak devam etmiştir. Beton üzerinde en çok konuşulan ve çalışma yapılan iki ana konu basınç dayanımının artırılması ve inşaat süresinin kısaltılması yönünde olmuştur. Günümüze yaklaşıldıkça ise betonun çevresel etkileri konusunda çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Günümüzde yapı teknolojisinde malzemelerden beklenen 3 kriter önemli yer tutmaktadır.

- Yapıların ve malzemelerin ekonomik olması
- Dayanım ve durabilite
- Malzemelerin çevre-etki değerlendirilmesi [9].

Beton, günümüzde yönümüzü nereye çevirsek karşılaştığımız bir yapı malzemesidir. Bu kadar sık kullanılan beton üzerinde yapılan araştırmalar ve bilimsel çalışmalarda, sektörün karşılaştığı problemler ve ihtiyaç talepleri üzerine artarak devam etmiştir. Geleneksel betonun, bazı yapılarda ihtiyacı tam anlamıyla karşılamadığından, özel bir beton üretmek için kurumlar tarafından çalışmalar başlatılmıştır. Geleneksel betondan farklı olarak, taze ve sertleşmiş betonun bazı özellikleri geliştirilerek, tasarım ve dizaynı geleneksel betondan farklı bir özel beton üretilmiştir. Kendiliğinden Yerleşen Betonlar (KYB)'da bu kapsam altında üretilmiş özel betonlardandır.

KYB ilk olarak 1988 yılında ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkış amacı yerleşmiş malzemede ve yapım işinde kaliteyi arttırarak daha dayanıklı beton elde etmektir. Betonun sıkıştırılmasının kaldırılması, yetersiz sıkıştırmaya bağlı olarak oluşan dayanım kusurlarını azalttığı, ayrıca geleneksel vibrasyonlu betona göre daha ekonomik, sosyal ve çevresel faydalarının olduğu ortaya konulmuştur.

KYB'nin tarihçesi ve gelişmesi 2 ana başlığa bölünebilir: Japonya'da 1980'lerin sonundaki ilk gelişim ve 1990'ların ortaları ve sonlarında Avrupa'ya tanıtılmasıdır. İlk araştırma yayınları 1989-1991 yılları arasında KYB'nin ilkelerini incelemiştir ve Japonya'da çıkmıştır. Bu çalışmalar yüksek performanslı ve süper işlenebilen betonlar ve onların doldurma oranı, akıcılık, segregasyon direnci gibi taze özellikleri üzerinde durmuştur. Modern KYB'nin tanımlanması hakkında ilk ciddi basımın Tokyo Üniversitesinde Ozawa tarafından 1992'de bir rapor olduğu düşünülmektedir. 1993'te araştırma yazılarında ilk KYB'nin gerçek uygulama alanlarındaki incelemelerinden bahsediliyordu. KYB terimini ilk kullanan basılı kaynak 1995 yılında Japonya'da yayınlanmıştır. Malzeme hakkındaki ilk ciddi uluslararası çalışma atölyesi 1998 Ağustos ayında Japonya'da Kochi Teknoloji Üniversitesi'nde kuruldu. Araştırmaların büyük çoğunluğu KYB'nin farklı ülkelerdeki gelişimi, karışım modelleri, karışım malzemeleri ve akışkanlık üzerine yoğunlaşmıştır. Nisan 1997'de JSCE (Japon İnşaat Mühendisleri Topluluğu) KYB'yi pratik olarak uygulamak amaçlı tavsiyeler vermek için alt araştırma ekibi kurdu. KYB hakkında 2.Uluslararası Sempozyum Tokyo Üniversitesi tarafından Ekim 2001'de organize edilmiştir. 2.Uluslararası sempozyum da uzun vadeli sağlamlık ve KYB'nin ömrü boyunca maliyeti hakkında konuşulmuştur [4].

Avrupa'daki bazı çalışmalar uluslararası RILEM (Uluslararası Deney ve Araştırma Malzeme ve Yapı Laboratuvarı Birliği) konferansında 1996 yılında Londra'da yayınlanmıştır. KYB tasarımı ile ilgili yazılar Londra Üniversitesinde, karışım tasarımı ise İsveç Çimento ve Beton Araştırma Enstitüsü (CBI) tarafından tanıtıldı. KYB ile ilgili olarak Avrupa'daki ilk ana olay 1999 yılında Stockholm'daki uluslararası RILEM sempozyumudur. Bu durum Avrupa'daki malzemeye olan ilgiyi göstermektedir. KYB'nin gelişimi ve kullanımı hızlıca İsveç'ten diğer Avrupa ülkelerine 1990'ların sonuna doğru yayıldı. Fransa ve Hollanda gibi ülkelerde beton sanayisi halen gelişmektedir ve bu malzemeyi kullanmaktadırlar. Bu ülkeleri Almanya ve İngiltere takip etmektedir. Bütün bu ülkelerde SCC yerinde ve hazır beton olarak kullanılmaktadır. Yunanistan ve Doğu Avrupa ülkeleri halen araştırmalarına devam etmektedirler veya deneme aşamasındadırlar. EFNARC tarafından bir yönetmelik ve kullanım kılavuzu yayımlanmıştır. Amaç yüksek kaliteli

KYB'nin kullanımı ve tasarımı için saha deneyimi ile son araştırma bulgularına dayanan bir sistem hazırlamaktır [4].

Kendiliğinden Yerleşen Beton kendi ağırlığı altında akabilen, çok yoğun donatı olsa bile vibrasyon enerjisi kullanılmadan yerleşebilen ve homojenliğini koruyarak kalıpları doldurabilen beton olarak tarif edilir. KYB beton yapımında yüzyılların en çağdaş gelişimi olarak görülmüş ve deneyimli işgücünü dengelemek için geliştirilmiştir [14].

Bir başka tanımıyla KYB, akıcılığı ve segregasyon direnci üstün seviyede olan, homojenik, asgari beton boşluklarına sahip, üniform beton dayanımı olan, yapılarda yüksek seviyede bitiricilik ve durabilite sağlayan bir betondur. Yerleştirme ve sıkıştırma için titreşim gerektirmeyen, kendi ağırlığı ile kalıbı tamamen doldurabilen, tam sıkışma sağlayan, sık donatılı güçlendirmelerde bile kullanılabilen yenilikçi bir beton türüdür [2]. Kendiliğinden yerleşen betonun amacı insana bağlı risk faktörünü azaltmak, ekonomik verimliliği sağlamak, tasarımcılar ve yapımcılar için özgürlük sağlamaktır.

KYB'ler üstünlük akışkanlık gösteren aynı zamanda stabilitesini muhafaza eden bir beton olup, ayrıca bir enerji ilavesi olmadan konsolide olur. Bu betonu karakterize eden başlıca 3 özellik vardır;

- Akma yeteneği, tüm alanlara ve kalıpların köşelerine yerleşmesini sağlar.
- Geçiş yeteneği, güçlendirilmiş kalabalık donatılı yerlerden, malzeme içeriğini oluşturan elementlerin segregasyona uğramadan geçmesini sağlar.
- Ayırmaya karşı direnç, malzemenin homojenliğini koruyarak, karışım içinde ki kaba agregaların ayılmasına engel olarak yerleşmesi yeteneğidir.

Bu özelliklerin sırasıyla yerine getirilmesi ve diğer sertleşmiş beton performansı sağlamak ve durabilite koşullarını sağlamak KYB tasarımı için yeterli parametrelerdir [4].

KYB temel bileşenleri açısından geleneksel betonlarla benzerlik gösterse de, taze beton özellikleri ve tasarım dizaynı açısından farklılıklar gösterir. KYB’de mineral katkıları kullanarak ince malzeme kullanımı, kimyasal katkıları özellikle de yeni nesil süperakışkanlaştırıcı kullanımı geleneksel betona göre daha fazla miktardadır [8].

1996’dan 2010 yılına kadar hazır betonların kullanım istatistiklerine bakıldığında C30/37 ve üzeri basınç dayanımına sahip betonların sektörde kullanım oranı %0,6 dan, %39,3 seviyelerine geldiği görülmüştür. Ancak yüksek dayanımlı beton kullanırken, betonun pompalanma sorunları, kalıp sorunları, işçilik hataları sonucunda basınç dayanımında hedeflenenin yakalanamaması, tüm bunlarda kolaylık sağlayan KYB’yi geleneksel betonun alternatifi konumuna getirmektedir [15].

KYB’ler reolojik ihtiyaçlarından ve hidrasyon probleminden dolayı, bağlayıcı madde miktarını kontrolü, viskoziteyi düzenleyici katkıları ile viskoziteyi kontrol altına almayı, hem de akışkanlaştırıcı katkıları kullanarak betonun işlenebilirliğini sağlamak için tasarımda ince malzemeyi kullanmışlardır. Toz şeklindeki kırmataşlar, silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu bu ince malzeme kategorisine girmektedir. Başka ince malzemelerin KYB’de kullanılmasına ilişkin çalışmalar devam etmektedir [16].

KYB’nin en önemli olan özelliği taze betonda akıcılık, akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri ile, diğer bir önemli olan özelliği segregasyona karşı direnç ise, yoğun bileşim içeriği ile elde edilir. KYB’yi tarif etmede önemli olan diğer parametreler ise karışımda kullanılan max. agrega çapı ve ince/kaba agrega oranıdır [8].

KYB faydaları bir dizi gerçek inşaat projelerinde de ortaya konmuştur. Dünyanın en uzun asma köprü uygulamalarından biri olan Akashi-Kaikyo Köprüsü KYB uygulamalarından en önemlilerden biri olmuştur. Bu projede toplam 240.000 m³ beton kullanılmıştır. KYB 200 m yüksekliğe pompalanabilmiş ve 3 m yükseklikten segregasyon olmadan dökülmüştür. KYB kullanılması nedeniyle toplam inşaat süresi 2,5 yıldan 2 yıla inerek inşaat süresinde %20’lik bir kısalma sağlanmıştır. Başka bir projede LNG tankı oluşturmak için KYB kullanılmıştır. Bu inşaat 38,4 m yüksekliğinde yüksek duvarlara döküm sağlanmış, inşaat için gerekli olan asansör

sayısında 14'ten,10'a bir azalma olmuş, çalışan işçi sayısı 150'den, 50'ye düşmüş ve inşaat yapım süresi 22 aydan 18 aya düşerek büyük yarar sağlanmıştır.

Kendiliğinden Yerleşen Betonlar çalışma ve araştırmalarda farklı isimlerle karşımıza çıkmaktadır. Türkiye'de Kendiliğinden Yerleşen Beton kavramı en sıkça kullanılan terimdir. Kısaltma olarak da baş harflerinden oluşmuş olan KYB en sıkça kullanılan kısaltmadır. Bilimsel alanda ülkeden ülkeye değişmekle birlikte Self Compacting Concrete (Kendiliğinden Sıkışan Beton), Self Levelling Concrete (Kendiliğinden Yüzeylenen Beton), Self Consolidating Concrete (Kendiliğinden Konsolide Olan Beton) olarak farklı isimlerle karşımıza çıkmaktadır [18].

2.2. KYB'lerin Kullanım Alanları

KYB'lar, genellikle yüksek pompalanabilirlik ve yüksek akıcılık özelliğiyle karmaşık kesitli ve yoğun donatılı mega inşaatlarda, son zamanlarda normal bina inşaatlarında da kullanılmaya başlanmıştır. Henüz çok yaygın olarak kullanılmasa da güçlendirme inşaatlarında kullanılmaktadır. Bakım ve onarım işlerinde de sıkça KYB'den yararlanılmaktadır. Yine henüz istenilen seviyede olmamasına rağmen otoyol ve köprü inşaatlarında kullanılmaktadır. Prefabrik endüstrisinde kullanım alanı oldukça genişlemeye başlamıştır [19].



Şekil 2.1. KYB'den üretilmiş prekast bir kolon [20].

KYB, estetik yönü ön planda olan yapılarda, betonun ulaşmasının güç olacağı yapılarda, vibratör kullanımının ince kesitler nedeniyle olanaksız olan inşaatlarda kullanılmaktadır. Hazır beton sektöründe standart beton kullanılan tüm yatay ve dikey elemanlarda, prefabrik inşaat elemanlarında, yüksek perdelerde, hazır altyapı elemanlarında, sualtı betonların yerleştirilmesinde, yüksek dayanım isteyen nükleer santraller ve önemli askeri yapılarda da KYB kullanılmaktadır. KYB'ler ayrıca mimari paneller, geniş yapı elemanları, çok geniş olarak imal edilen saha betonlarında ve döşemelerde, cephe elemanlarında kullanılmaktadır.

2.3. KYB'lerin Avantaj ve Dezavantajları

Avantajları;

- Geleneksel betonla yapılan inşaatla karşılaştırıldığında daha hızlı yapım inşaat nedeniyle, inşaat sürelerinin kısalması ve buna bağlı olarak planlamada ve maliyette önemli bir tasarruf sağlar.
- Kendiliğinden yerleşebilir olması, şantiye işçiliğini azaltacağından işgücünde tasarruf sağlar, %20 ile %40 arasında iş tasarruf edileceği çeşitli araştırmalarda öne sürülmüştür. İşgücünde yapılan bu tasarruf hem inşaat süresine hem de maliyete olumlu anlamda katkı yapar.
- Yüzey pürüzsüzlüğünün yüksek olması sebebiyle beton yüzeyinin daha iyi görünmesine katkı sağlayarak, estetik açıdan iyi görünmesine neden olur. Perdah konusunda kolaylık sağladığı için beton dökümünde zamandan tasarruf sağlar.
- KYB'nin geleneksel betonla karşılaştırıldığında yüksek dayanıma sahip olması, mekanik performansında iyileşmeler sağlayarak geliştirilmiş dayanım sağlamaktadır. Bu nedenle yüksek performanslı beton sınıfına girmektedir.

- KYB kullanılan bir yapının tasarım ve dizayn aşamasında, yapıya deprem kuvvetleri açısından olumlu özellikler kazandıracaktır. Yapının taşıyıcı sistem elemanlarının daha küçük kesitlerde planlanmasını sağlayarak yapının zati yüklerinde önemli bir azalma sağlayacaktır. Kesitlerin küçülmesine bağlı olarak donatı hesapları sonucunda daha az donatı kullanılarak yapının sabit yüklerine bir başka anlamda olumlu katkı yapacak, donatı işçiliğinden tasarruf edilecek, aynı zamanda hem malzemeden hem işçilikten ekonomik tasarruflar sağlanmış olacaktır. Kesitlerin azalması sonucu yapı kullanım alanı olumlu anlamda artacak, yapıya etki eden deprem kuvvetleri azalacak, hem daha kullanışlı hem de depreme karşı daha güvenli yapılar elde edilecektir [21].
- Kolay yerleşebilirlik özelliği, mevcut kalıpları tamamen ve boşluksuz doldurması, daha ince beton kesitlerinde çalışma imkanı, kısıtlı alanlara ulaşması ve sabit dolum kolaylığı sağlar. Yapı tasarımında daha büyük serbestlik ve özgürlük kazandırarak, yapısal ve mimari kesitler oluşturmak için fırsatlar kazandırır. Geliştirilmiş ve daha düzgün bir mimari yüzey sonucunda, estetik yapıların daha kolay üretilebilir olmasına imkan vermektedir.
- KYB’de sıkıştırma ihtiyacına gerek kalmayacağından vibratörün ortadan kalkmasıyla, ekonomikliğin temeli olan para, zaman, enerji üçlüsünde iyileşmeler yaşanacak, çevreye verilen gürültü azalarak ses kirliliği önlenecek ve daha güvenli çalışma ortamı sağlamaktadır.
- Uzun mesafelere geliştirilmiş pompa özellikleri sağlayarak, çok katlı mega yapıların üretiminde önemli ekonomik katkılar sağlar.
- Değişken operatör özellikleri ortadan kaldırıldığı ve işçilik hatalarını en aza indirdiği için betonda üniformaluluk sağlamasıyla daha güvenilir yapılar ortaya çıkarır [21].

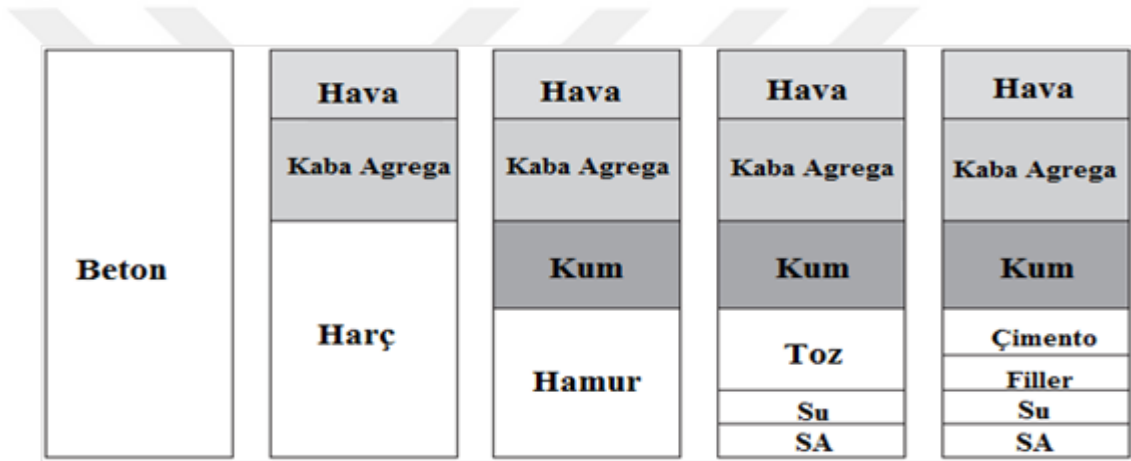
- Kamyon seferlerinin hızlı olması nedeniyle, üreticinin projeyi daha hızlı servis etmesini sağlar. Yerleştirme esnasında hazır beton kamyonlarının pompalarının yerleşim yerlerinin değişimini en aza indirgeyerek zamandan tasarruf sağlar.
- Vibratör gürültüsünün azaltılması ya da ortadan kaldırılması ile gece saatlerinde de çalışma imkanı sağlayarak, kentsel alanlarda inşaat çalışma saatlerini artırmaktadır.
- KYB'nin ana parametlerinden olan akıcılık, işlenebilirlik ve segregasyon oluşmaması büyük bir avantaj sağlayacaktır.
- Beton dökümü esnasında herhangi bir sıkıştırma enerjisi uygulanmayacağından, kalıp ömründe uzamalar sağlanacaktır. Kalıp ömrünün uzaması kalıbın başka inşaatlarda da kullanılmasını sağlayacağından ekonomiklik sağlayacaktır.
- KYB ile üretilen betonların daha boşluksuz ve daha az geçirimli olması nedeniyle durabilitenin daha yüksek olmasına sebep olur. Bu sebepten dolayı betonun bakım ve onarım masrafları azalır.
- Güçlendirme projelerinde betonun yerleştirilmesi zor olduğundan geleneksel betona göre bu projelerde daha etkili kullanılabilmesini sağlar.
- Atık olarak bulunan malzemelerin KYB'de kullanılması ile çevresel katkıda bulunur.
- Yoğun titreşimle çalışan elektrikli el aletleri kullanan makine operatörlerinde yaygın olarak görülen ve ciddi sonuçları olabilen bir eklem hastalığı olan Beyaz Parmak Sendromu titreşimli ekipman kullanan işçiler olmayacağı için büyük ölçüde önlenmiş olur.

Dezavantajları;

- Geleneksel betona göre birim fiyat olarak yüksek olmasından dolayı ekonomik olmayışı, birim maliyeti artıran en önemli parametre kullanılan kimyasal katkılardan dolayıdır.
- KYB'nin birden fazla özelliğin aynı anda bir arada olması gerekliliği, performansının hassas kriterlere dayanması nedeniyle, üretim esnasında tecrübeli ve bilgili personel ihtiyacını doğurmaktadır.
- KYB kullanılan ülkelerde, üzerinde uzlaşmış, tek tipleşmiş standart deney yöntemleri ve karışım dizaynları yer almadığından, standartların ülkeden ülkeye değişmesi sonucu kontrol bir standart bulunmayışından, KYB performans tanımının da ülkeden ülkeye farklı sonuçlar doğurmasına neden olmaktadır.
- Dünya genelinde kullanılan kalıp sistemlerinin birçoğunun geleneksel betona göre üretilmiş olması ve KYB kullanımı için uyumlu olmaması. KYB kullanımı içi hazırlanan kalıplarda zorluklar yaşanması, destek sistemlerinin çok detaylı olmaması, kalıplar üzerindeki hidrostatik basınç sebebiyle tasarımın tecrübe istemesi, bunları hazırlamak için çalışan işçilerin tecrübelerinden dolayı ücretlerindeki artış.
- Geleneksel betona göre daha fazla viskozite problemi yaşar.
- Kesitlerin eğimli olan kısımlarında uygulamada güçlükler yaşanması.
- Yukarıda avantaj olarak saydığımız elde edilen pürüzsüz yüzeylerin, sıva tutması yönünde çıkardığı zorluklar.
- Karışım dizaynında ince agrega miktarının, kaba agrega miktarına göre fazla olduğundan plastik büzülme olayı görüleceğinden, beton kürünün erken yaşlarda yapılmasının önemli olması.

2.4. KYB'lerin Tasarım Dizaynı

KYB'nin, geleneksel betona göre en önemli dezavantajlardan birisi de birim maliyetidir. Bu yüksek maliyetin en önemli kaynağı ise kullanılan kimyasal katkıları ve kullanılan bağlayıcı madde (çimento) miktarının çok fazla olmasıdır. Kimyasal katkıların KYB dizaynında vazgeçilmez olması, KYB'nin birim maliyetini azaltmada bizi bağlayıcı madde miktarında değişiklik yapmaya sevk eder. Karışımında kullanılan çimento miktarını, toz haldeki veya puzolanik mineral katkıları kullanarak, çimento yerine ikame ederek, hem maliyette hem de mineral katkıların sağlayacağı diğer olumlu özellikler betona kazandırılmış olur [22].



Şekil 2.2. KYB'nin şematik bileşimi [23].

KYB'nin en önemli özelliği akıcılıktır. Akışkanlık ise kimyasal katkılarıyla sağlanır. Kimyasal katkıların düzeyinin yüksek olması ise viskoziteyi düşürür. KYB dizaynında Japonya'da bugün bilinen 3 ayrı metot bulunmaktadır. Bu sınıflandırmalar betonun viskozitesini düzenlemek amacıyla tasarıma kullanılacak malzemelere göre yapılmıştır. Bunlardan farklı olarak da birçok tasarım ve dizayn metodu bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanmaktadır.

- Toz tipi metodu
- Viskozite tipi metodu
- Kombinasyon metodu

a)Toz Tipi Metodu

Betona yeterli ölçüde segregasyon direnci kazandırmak ve deformasyon yeteneği verebilmek için su/toz malzeme oranının minimum tutulmasıyla elde edilir. İnce malzeme miktarı karışım içinde yüksek tutularak sağlanabilir. Hiperakışkanlaştırıcı katkıları ve hava sürükleyici katkıları bu metotta kullanılmaktadır. Toz tipi metodunda 125 mikron altı olan inorganik maddeler kullanılır. Toz hacmi toplam hacmin % 36'sı kadardır. Uçucu kül, cüruf, silika dumanı, kireç taşı tozu, cam tozu gibi maddeler, toz malzeme olarak kullanılmaktadır. Toz malzemeler kullanmak agrega ile hamur arasındaki aderansı sağlamlaştırır ve büzülmeyi önleme de olumlu etki eder. Aynı zamanda toz malzeme kullanmak ekonomik anlamda katkı sağlar. Toz tipi metodu tecrübe ve zahmet gerektiren bir metot olduğundan kullanımı çok fazla tercih edilmemektedir.

b)Viskozite Tipi Metodu

Ayrışma direnci ve deforme olma kabiliyeti özellikleri kazandırmak için viskozite düzenleyici katkılarıyla birlikte hiperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkının kullanılması ile elde edilir.

c)Kombinasyon Tip Metodu

Kalite kontrole yardımcı olmak için viskozite düzenleyici katkıları ile rutubet ve agrega gradasyonunda ki değişimleri ve kalite değişimlerini önlemek için kullanılan metottur Yukarıdaki kullanılan iki tip metot bu metotta birlikte kullanılabilir. Toz içeriği ve viskozite düzenleyici katkıları yine bu metotta kullanılır. Ancak mineral katkı maddesi kullanılarak viskozite artırmanın kimyasal katkıları kullanarak viskozite artırmada daha başarılı olduğu çeşitli araştırmalarda deneylerle gösterilmiştir [19,24].

Çizelge 2.1. Japonya’da kullanılan KYB karışım dizaynı metotları [25].

Malzemeler	Toz Tipi Metodu	Viskozite Tipi Metodu	Kombinasyon Tipi Metodu
Su (kg/m^3)	175	165	175
Çimento (kg/m^3)	530	220	298
Uçucu Kül (kg/m^3)	70	0	206
Granüle Y. Fırın Cürufu(kg/m^3)	0	220	0
Silika Dumanı (kg/m^3)	0	0	0
İnce Agregası (kg/m^3)	751	870	702
Kaba Agregası (kg/m^3)	789	825	871
Hiper Akışkanlaştırıcı (kg/m^3)	9	4,4	10,6
VDK (kg/m^3)	0	4,1	0,0875
Yayılma Çapı (mm)	625	600	660

KYB tasarımları geleneksel betondan farklılıklar gösterir. KYB’nin sahip olması gereken özellikleri edinmek için karışım oranlarında ki dengeyi tutturmak tecrübe gerektiren bir işlemdir. KYB üretimi için kontrol aralıkları birbirinden oldukça farklı, geniş aralıklara sahip birçok standart vardır. KYB’nin özellikle taze beton özellikleri göz önünde bulundurularak ve sahip olması gereken yeterli kohezyon, yüksek derecede akışkanlık, segregasyonu önlemek ve bunları aynı anda KYB’de birleştirmek için tasarımda dikkat edilmesi gereken hususlar vardır.

KYB’nin dizaynında dikkate alınan en önemli karışım yöntemi Okamura’nın 2003 yılında geliştirdiği yöntemdir. Bu yöntemle göre KYB üretimi için karışım dizaynını yaparken şu hususlara dikkat edilmelidir [25].

- İnce malzeme içeriğinin oranı
- Kaba malzeme içeriğinin oranı
- Karışım içindeki hava miktarının oranının belirlenmesi
- Hamur içeriğinin bileşenlerinin belirlenmesi

- Karışımında kullanılacak olan kimyasal katkıının oranının belirlenmesi
- Su/bağlayıcı madde oranının belirlenmesi
- KYB özelliklerinin standartlarda belirtilen deney yöntemleriyle test edilmesi

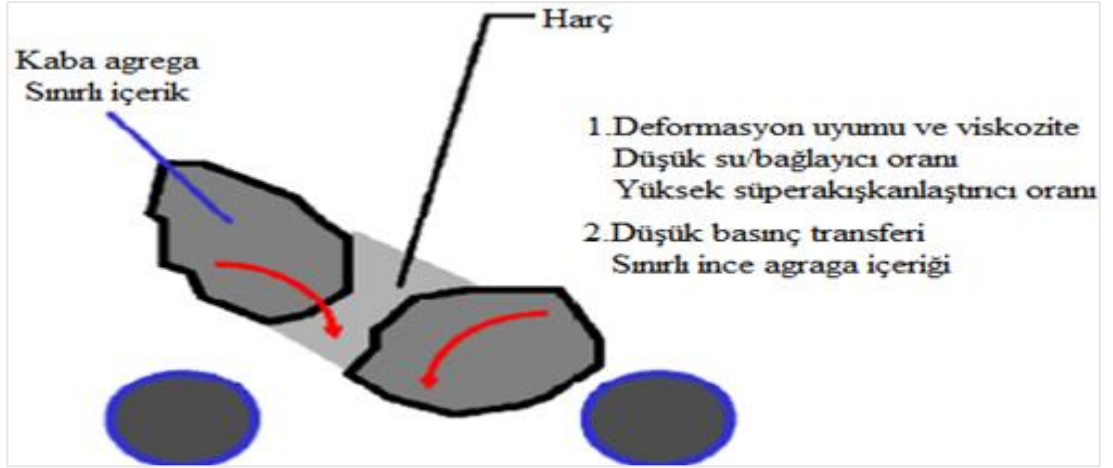
Yukarıda sayılan özelliklerin doğru bir şekilde yapılması, iyi bir KYB elde edebilmek için anahtar işlemlerdir. Bunların yanında ortam sıcaklığı ve beton sıcaklığı dikkate alınmalı, çatlamlar ve basınç dayanımı için kullanılacak katkıının oranının yanında tipinin de önemli olduğu unutulmamalıdır. KYB’de hamur fazının, mevcut agregalar da taşınmasının önemli bir kavram olduğu, agregaların hepsinin bu hamur harcı ile sarılması büyük önem taşımaktadır. Bu işlerin KYB’nin akıcılığını artırdığı ve agregaların birbirine sürtünmesini azaltarak taşınımına yardımcı olduğu bilinmektedir.

Bunların hepsi göz önüne alındığında;

- Karışım içinde ki iri agreganın ince agregaya göre daha az miktarda kullanılması
- Hamur miktarının geleneksel betona göre hacimce fazla olması
- Su/toz malzeme oranının düşük olması
- Akışkanlaştırıcı katkı malzemesi miktarının artırılması
- Viskozitede problemler yaşandığında viskozite düzenleyici katkı kullanımı

gibi yöntemlerle KYB dizayn edilir.

Beton bileşiminde segregasyonu azaltmak için taneler arası sürtünmeyi azaltmak gerekir. Bunu yapmak için bileşimde ki hamur miktarı artırılmalıdır. Bileşim içindeki su miktarını artırmak taneler arasında ki sürtünmeyi azaltmak için bir çözüm yöntemi değildir. Çünkü su miktarı arttıkça ayrışma eğilimi artacaktır. Akışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanılması bu problemi ortadan kaldırırken, viskozite azaltılmadan taneler arası sürtünme azalacaktır [26]. KYB’nin en önemli özelliği olan kendiliğinden yerleşmenin mekanizması Şekil 2,3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Kendiliğinden yerleşmenin çalışma mekanizması [27].

KYB, EN 206 şartlarını sağlayacak şekilde (yoğunluk, dayanım gelişimi, son dayanım ve sağlamlık) dizayn edilebilir. Tozun yüksek miktarına bağlı olarak KYB normal beton karışımlarına göre daha çok plastik büzülme veya yayılma gösterebilir. Bu görüşler KYB'yi dizayn ederken ve belirlerken göz önünde tutulmalıdır. Bu görüşlerdeki bilgi düzeyi sınırlıdır ve daha fazla araştırma gerekmektedir. Kendiliğinden yerleşen betonun üretimi malzemenin, işlemenin ve ekipmanların kontrol edildiği santralde yapılmalıdır. Üretim elemanlarının eğitimli ve KYB üretiminde deneyimli olmaları tavsiye edilir.

KYB dizaynında ve üretim aşamasında yararlanılacak çok kaynak olduğu için tek bir dizayn yönteminden de söz edilemez. Örneğin Yarugi ve arkadaşları KYB tasarımı kum miktarının harç içinde %75 civarında, iri agregat hacminin toplam hacim içerisinde %30'dan az olacak şekilde üretilmesini tavsiye etmişlerdir. Okamura ve arkadaşları ise iri agregat oranını, KYB'lerde %50'ye varan oranlarda kullanılabileceğini tavsiye etmişlerdir [6].

KYB dizaynı için birçok hazır beton firması, katkı firmaları, akademik enstitü zaman içinde kendi karışım tasarım dizaynını geliştirmişlerdir. 2016'nın Mart ayında güncellenen, Haziran 2009'daki standartın yerine geçen TS 802'de de KYB elde edilebilmesi için kullanılan bileşenlerin ağırlık ve hacimce tipik aralığının bir

göstergesi Çizelge 2,2’de verilmiştir. Bu oranlar KYB tasarımı için kısıtlayıcı bir sınır aralığı olmamakla birlikte tasarım için fikir verir.

Çizelge 2.2. KYB karışım kompozisyonun ağırlık ve hacimce tipik aralığı [28].

Bileşen	Kütlesel Aralık (kg/m ³)	Hacimsel Aralık (litre/m ³)
Toz	380-600	
Pasta		300-380
Su	150-210	150-210
Kaba Agrega	750-1000	270-360
İnce Agrega	Karışım içindeki diğer malzemelerin hacimlerine göre, genellikle toplam agreg ağırlığının yaklaşık %48-%55 i arasında kullanılır.	
Su/toz oranı		0,85-1,10

Laboratuvar denemeleri ilk karışımın özelliklerini doğrulamak için kullanılmalıdır. Eğer gerekliyse ilk karışım a ayarlamalar yapılmalıdır. Bütün gereksinimler sağlandığında karışım beton santralinde veya şantiyede test edilmelidir. Yeterli performans alınamazsa, temel dizaynın yeniden yapılmasına önem verilmelidir KYB’nin tipik bir karışımın kompozisyonu sayısal olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir [25].

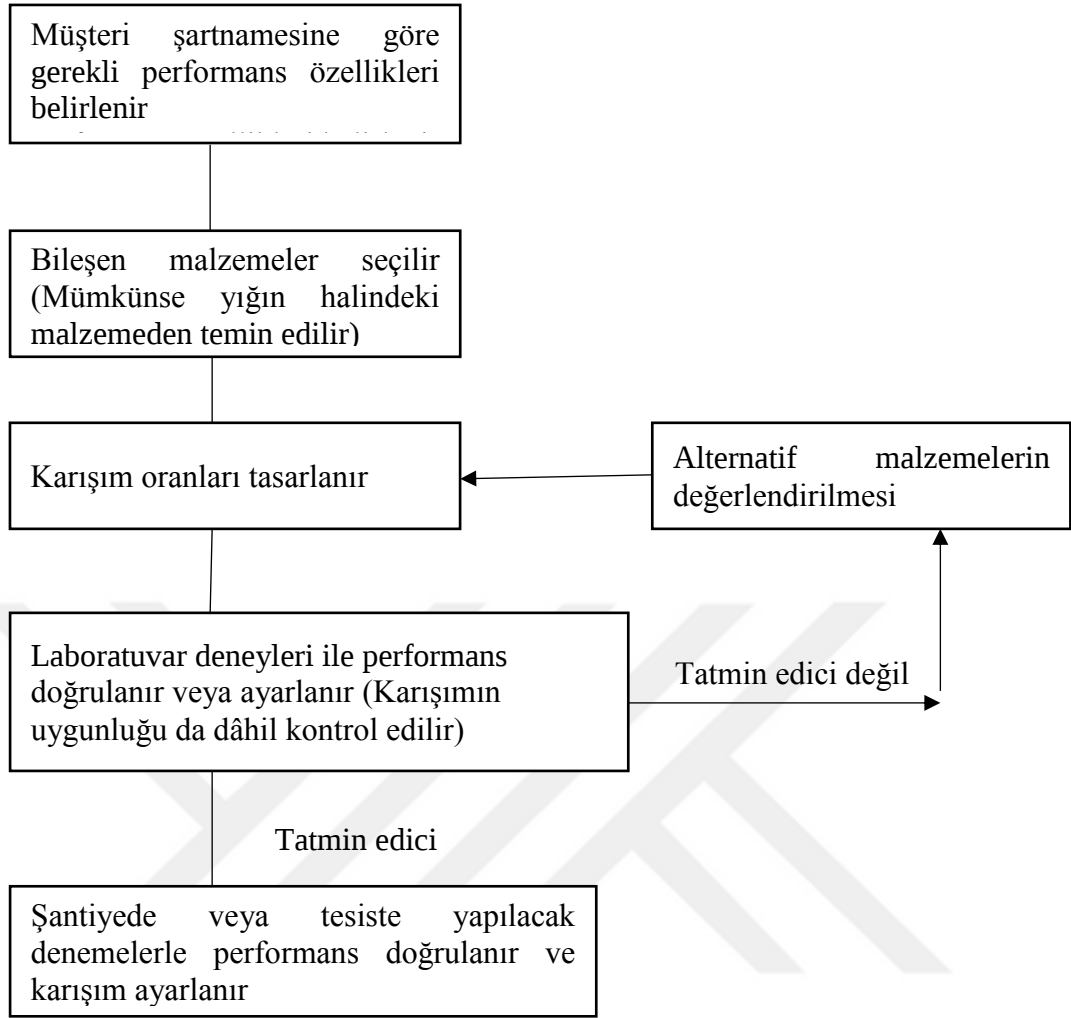
- Kaba agreg a < %50
- Su/Toz oranı < 0,8 – 1,00
- Toplam toz içeriği 400 – 600 kg/m³
- Kum içeriği < Harcın % 40 (hacim olarak)
- Kum < Hamur hacminin % 50 si
- Kum içeriği > Toplam agreg a ağırlığının % 50 si
- Serbest su < 200 lt
- Hamur > Karışım hacminin % 40’ından fazla

Genel olarak KYB karışımları geleneksel betonların arasından geliştirilen, geliştirilmiş karışım oranları kullanılır. Yine de KYB karışımlarının nispi oranları geleneksel betondan farklıdır. Şekil 2,4'den de görüldüğü üzere verilen toplam hacimler için KYB karışımlarının kaba toplam hacmi, geleneksel betona orana çok daha küçüktür. Çimento ve bağlayıcı madde hacmi toplamı yine geleneksel betona oranla fazla olmakla birlikte karışım içinde ki su miktarları benzerlik gösterir. Sonuç olarak göreceli karışımlar karşılaştırıldığında KYB karışımlarının daha düşük kaba agrega toplamına, daha yüksek hamur hacmine ve daha düşük su/bağlayıcı oranına sahiptirler. Bu özellikler KYB karışımlarının daha mükemmel bir işleyişe sahip olması için gereken özellikleridir. Beton karışımında ki ince agreganın içeriğinin fazla olmasının nedeni agregalar arasında çarpışma ve temas sıcaklığını azalttığı ve katı cisimler arasında ki parçacık etkileşimini azalttığı içindir [29].



Şekil 2.4. Geleneksel beton ve KYB'nin malzeme hacmi karşılaştırması [27].

TS 802'e göre Şekil 2.5'te KYB tasarımı için bir akış şeması önerilmiştir. Tasarım sonucunda istenen özellikler elde edilemediğinde tasarım yenilenmesi gerekmektedir.



Şekil 2.5. KYB tasarım akış şeması grafiği [28].

2.5. KYB Karışımlarında Kullanılan Malzemeler

Özel bir beton türü olan KYB tasarlanırken belli kriterlere dikkat edilmesi gerekmektedir. Kullanılacak olan malzemeleri optimum oranda kullanmak gerekir. Malzemelerin teknik özelliklerini ve etkilerini iyi bilmek, ekonomik olması için doğru malzemeleri kullanmak ve karışım oranları geleneksel betondan farklılık gösterdiği için tecrübeli personel eşliğinde üretim önem arz etmektedir.

2.5.1. Çimento

KYB üretiminde TS EN 197-1'e uygun bütün çimentolar kullanılabilir. KYB'lerde ince agrega içeriği geleneksel betona göre daha fazla olduğundan, kullanılacak çimento miktarı da buna uygun olarak fazla olmaktadır. KYB'de kullanılacak çimento miktarı, standartlarda tek tipleşmediğinden ayrıca toz mineral malzeme kullanımı da çimento miktarını etkilediğinden tek bir değerden söz edilemez. [30].

KYB'de kullanılacak olan çimentoda, çimentonun ana bileşenlerinden olan C3A'nın oranının %10'dan fazla olduğu durumlarda karışımlarda kullanılmasının uygun olmayacağı belirtilmiştir. Çimento içerisinde yüksek C3A oranı hızlı etrenjit oluşumu ve işlenebilirlik kaybına neden olmaktadır.

Ayrıca kimyasal etkiler ve sülfat etkisi nedeniyle, işlenebilirliği azalttığından katkı ihtiyacının artmasına böylece maliyet üzerinde de olumsuz etkilere neden olur. C3A'nın olumlu etkisinin ise erken yaş dayanımlarında artırıcı etkisi sayılabilir. Çimentonun karışımlarda ne kadar kullanılacağına ana etkeni dayanım ve durabilitedir. Çimentonun 350-450 kg/m³ arasında kullanımı tavsiye edilmektedir. Çimentonun 500 kg/m³ üstünde kullanımı rötre açısından olumsuz etkileri olacağından tavsiye edilmez. 350 kg/m³ altında kullanıldığında ise filler malzeme ve viskozite düzenleyici katkılarla kullanımı uygundur [19,31].

2.5.2. Agrega

Agreganın taze betonun işlenebilirliğinde çok önemli işlevleri vardır. Agregalar, beton hacminin yaklaşık %75'ni oluşturmaktadır. İşlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılıkta; agreganın kalitesinin, biçiminin, maksimum tane boyutunun, boyut dağılımı gibi özelliklerinin belirleyici olduğu bilinmektedir. KYB üretiminde kullanılacak olan agregalar TS 706 EN 12620'ye uygun olmalıdır. Agregaların şekli kadar dayanım şartları da önemli olduğundan TS EN 206-1'e göre dayanım ve dayanıklılık şartlarını da sağlaması gerekmektedir [30].

KYB’de kullanılacak olan agregaların muhafaza koşulları geleneksel betona göre daha önemlidir. Agreganın nem oranının, yüzey doygunluğu, su emmesi gibi kriterler KYB’nin taze haldeki özelliklerini ve kullanılacak olan katkıyı önemli oranda etkilemektedir. Bu yüzden karışım tasarımının kuru yüzey doygun agregalara göre dizayn edilmesi ve saklanması KYB üretimi açısından avantajlar sağlayacaktır [24].

KYB dizaynı sırasında agrega karışım çalışması yapılırken agregalar arası boşluk minimum düzeyde olacak şekilde tasarlanmalıdır. KYB’nin en önemli özelliklerden biri olan yerleşmeye etki eden parametrelerden biri de iri agrega/kum oranıdır. Tanelerin arasında sürtünmeyi azaltmak için bu oran oldukça minimum tutulmalıdır. Aynı zamanda bu oran geçiş yeteneğini de etkileyeceği için önem arz etmektedir [19].

KYB’lerde yüksek akıcılık sağlamak için kırmataşlar yerine, yuvarlak çakıllar tercih edilmelidir. Kırmataşlar köşeli olduğu için pek tavsiye edilmese de iri agregalı ve yuvarlak çakılların ulaşımı zor agrega türü olduğundan KYB’lerde genellikle kırmataş agregalar kullanılmaktadır [32,33].

Yıkanmış agrega kullanmanın KYB’de olumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir. İnce malzeme olan silt, kil gibi malzemeler ve kirlilik önlenmelidir, aksi takdirde aderans azalacak ve su ihtiyacı artacaktır. Kırmataş ve dere agregasının bir arada kullanmak daha olumlu sonuçlar alınacağı yapılan çalışmalarda görülmüştür. Kırmataş agregası basınç dayanımına olumlu etki ederken, dere agregasının işlenebilmeyi artırdığı gözlenmiştir [34].

2.5.3. Toz malzeme

Toz maddelerin hangi çapa göre toz madde olarak değerlendirileceği, bilimsel çalışmalarda araştırmacılar tarafından farklılıklar göstermektedir. Kimi araştırmacılar 80 μm , kimi ise 100 μm sınırını getirmişlerdir. Toz bileşenler için karışım tasarımında boyut olarak bir limit değeri zorunlu olmamasına rağmen Avrupa’da bu limit 125 μm , Japonya’da 75 μm olarak belirlenmiştir [32].

Toz malzemelere uçucu kül, kireçtaşı tozu ve cam tozu, yüksek fırın cürufları, silis dumanlarını örnek verebiliriz. Bu toz malzemeler viskoziteyi düzenlemede kullanılır. Toz malzemeyi karışımda 400 ile 650 kg/m³ arasında kullanılması tavsiye edilmiştir. Herhangi bir toz malzeme kullanmadan da KYB üretmek mümkündür.

Mineral katkıları; viskoziteyi modifiye etmek, akışkanlığı işlenebilirliği düzenlemek için kullanılmaktadır. Hidratasyon ısısını ve termal büzülme azaltmak için çimento miktarını da düzenler. Mineral katkıları suyla reaksiyon kapasitelerine göre 2 tipte sınıflandırılmaktadır [35].

Çizelge 2.3. Mineral katkı tipleri [35]

TİP I	Puzolanik olmayan Yarı puzolanik	- Mineral filler(Kireçtaşı,dolomit,vs.) - Pigmentler
TİP II	Puzolan	- TS EN 450-1'e uygun uçucu kül - TS EN 13263-1'e uygun silis dumanı
	Hidrolik	Yüksek Fırın Cürufu

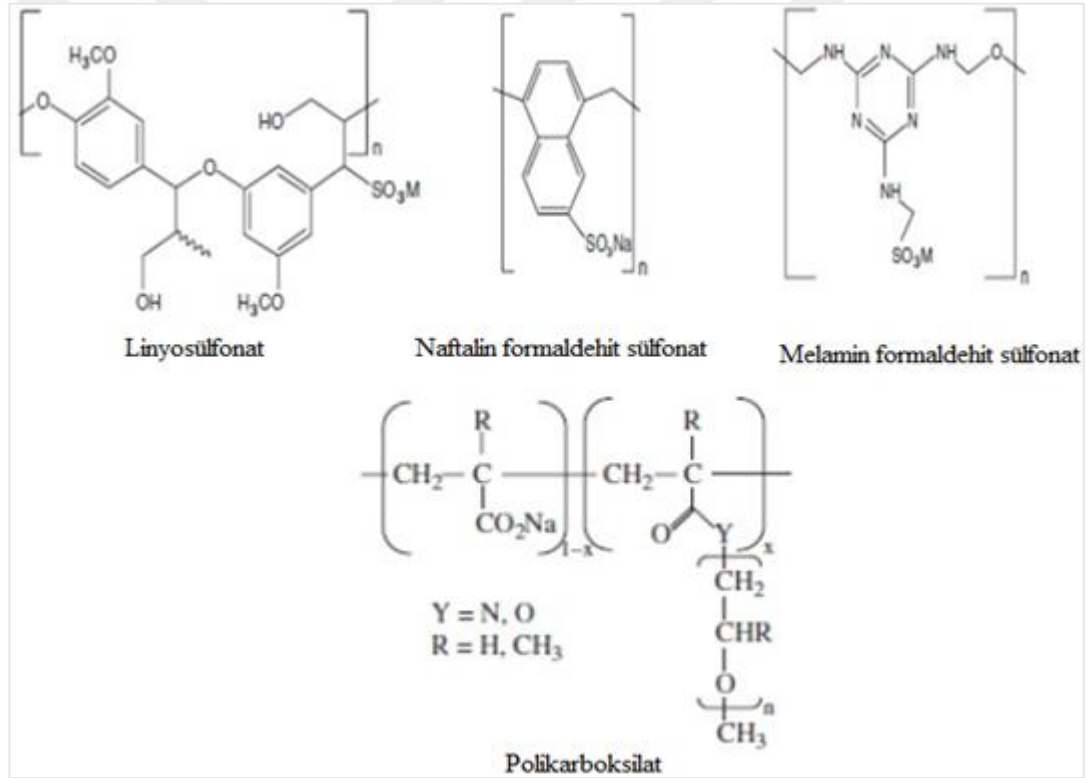
2.5.4. Akışkanlaştırıcı katkı

ASTM C 125 katkı maddesini betonun geleneksel bileşenleri olan su, çimento, agrega, dışında hemen karıştırma öncesi veya karıştırma sırasında beton harmanına ilave edilen maddeler olarak tanımlamaktadır. Bu maddeler organik ya da inorganik esaslı olup beton bileşimine ağırlıkça toplam bağlayıcı maddesinin %5'ini aşmayacak oranlarda katılan maddelerdir.

Teknoloji ve bilimde ki gelişmeler, beton teknolojisine de yansarak kimyasal katkıları, betonun beşinci bileşeni durumuna getirmiştir. İlk olarak 1930'larda ortaya çıkan akışkanlaştırıcı katkıların temelini lignosülfatlar oluşturmaktaydı. 1960'lı

yıllara gelindiğinde sülfonatlı naftalin polimer esaslı süperakışkanlaştırıcı katkıları ortaya çıkmıştır. 1990’lardan sonra ise önce vinil kopolimerler ve en son olarak da modifiye polikarboksilatların ortaya çıkmasıyla beton teknolojisinde oldukça yeni bir kapı aralanmıştır [36].

Linyosülfat, naftalin formaldehit sülfonat ve melamin formaldehit sülfonat esaslı normal SA’lar, genellikle KYB üretimi için gerekli sınır değerleri sağlamada yetersiz kalmışlardır. Bu sebepten dolayı polikarboksilat esaslı SA’lar KYB üretiminde daha çok tercih edilir hale gelmiştir. Bu akışkanlaştırıcıların kimyasal formları Şekil 2,6’da verilmiştir.



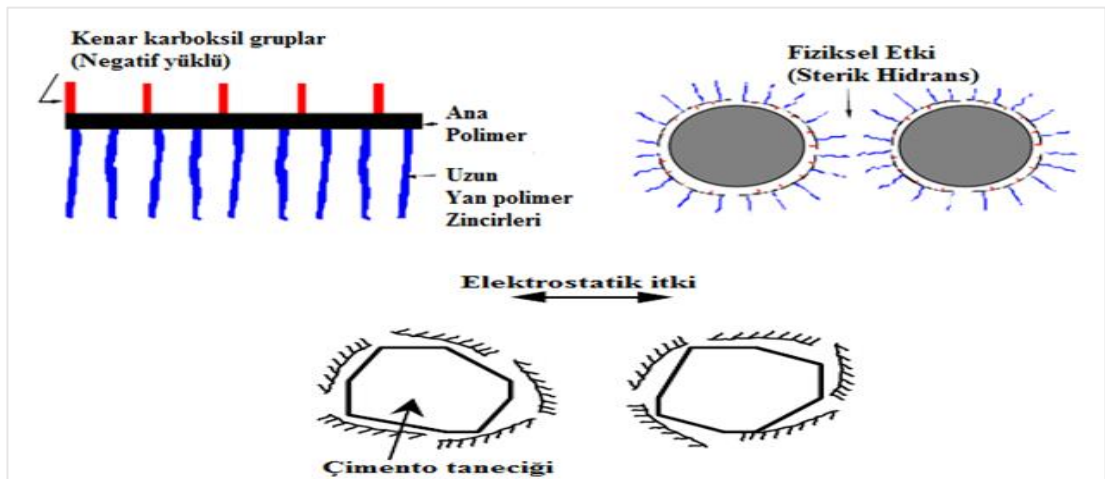
Şekil 2.6. Akışkanlaştırıcı katkıların kimyasal formları [37].

SA nispeten yeni bir kategori olup akışkanlaştırıcının geliştirilmiş halidir. Kullanım sırasıyla 1960-1970 döneminde Japonya ve Almanya’da geliştirilmiştir. SA’lar kimyasal olarak normal akışkanlaştırıcılardan farklıdır [38]. Bu kimyasal katkıları

aynı işlenebilirlikte betonun su ihtiyacını azaltırlar. Su azaltma oranlarına göre, su azaltıcı ve yüksek oranda su azaltıcı olarak sınıflandırılırlar.

Polikarboksilat esaslı SA'lar ana olarak bir zincir ve buna bağlı yan zincirlerden oluşmuştur. Bu çimento parçacıklarının mükemmel olarak ayrışmasını sağlar, akışkanlığı belirgin oranda iyileştirir, düşük s/ç oranlarında betonun akışkanlık performansını artırır. Çimento taneciklerinin dağılması genel olarak parçacıklar arasında ki elektriksel ve sterik itme sonucu olduğu düşünülmektedir [39].

Çimento su ile temas etmesinden sonra ortama Ca^{++} iyonları vermektedir. Ca^{++} iyonlarının konsantrasyonlarının artması neticesiyle polimer esaslı akışkanlaştırıcı katkı malzemelerinin polimer moleküllerinin tane yüzeylerine yapışması gerçekleşmektedir. Tane yüzeyinde (-) yükle yüklenen çimento taneleri birbirini iterek elektrostatik yükleri de değiştirmektedir. Bu mekanizma iç sürtünmeyi azaltarak işlenebilme yeteneğini artırmaktadır. Yeni kuşak SA'lar da dağıtma etkisiyle birlikte sterik etki de akışkanlığa olumlu etki etmektedir. Sterik etki uzun dallar içeren polimer zincirleri sayesinde çimento taneleri çevresinde oluşan bir fiziksel etki olup, çimento taneleri bu yolla daha kararlı hale gelir [40]. Elektrostatik ve sterik etkiler Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Akışkanlaştırıcı katkıların elektrostatik ve sterik etkisi [41,42].

Polikarboksilatların katkıda etkili olmasına etki eden faktörler ;

- Dallanmış yan zincir uzunluğu
- Dallanmış yan zincir yoğunluğu
- Polimerizasyon derecesi
- Karboksilik grupların yoğunluğu

sayılabilir [43].

Yeni nesil SA katkı malzemelerinin olumsuz yanı ise KYB'nin ayrışma direncinde bir miktar azalmaya neden olmasıdır. Bu sebepten dolayı segregasyonu önlemek için agrega toplam hacmi içerisinde ki ince agrega miktarını artırma veya bağlayıcı madde miktarını artırma yoluna başvurulmaktadır. Bir başka çözüm yolu ise viskozite düzenleyici katkıları kullanarak ayrışma direnci kazandırmaktır [44].

2.6. Taze Haldeki KYB Özellikleri

KYB'de hedeflenen performans değerleri geleneksel betondan farklılıklar gösterir. Geleneksel betondan beklenen performans özelliklerinin başında slump değerleri ve basınç dayanımı gelirken, KYB'de performanstan önce betonun taze haldeki özellikleri önem arz eder. Bu özelliklerin elde edilebilmesi içinde beton dizaynının da geleneksel betonlardan farklılıklar gösterir. KYB'den öncelikli olarak beklenen özellikler, betonun akıcılığı, geçiş yeteneği, doldurma kabiliyeti, ayrışmaya karşı direnç göstermesidir. Ancak bu metotlardan hiçbiri tek başına kendiliğinden yerleşebilirlik tanımı için yeterli değildir. Taze beton özelliklerini belirlemek için kullanılan bu metotların birkaçının aynı anda uygulanmasıyla daha kesin sonuçlar elde edilerek belirsizlik daha aza indirgenebilir [45].

KYB'de işlenebilirlik özelliği test edilirken, geleneksel betonda kullanılan test yöntemlerinden farklı metotlar kullanılır. KYB'nin işlenebilirlik özelliği ile ilgili Çökme-yayılma deneyi, V hunisi deneyi, J halkası, L kutusu, U kutusu gibi taze beton deneylerinin yanında değişik standartlarda da bu özelliklerle ilgili test metotları geliştirilmiştir.

Taze haldeki KYB'nin özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneylerin KYB'nin temel parametreleri hangileri hakkında fikir verdiği aşağıda çizelgede verilmiştir.

Çizelge 2.4. KYB'nin işlenebilirlik özellikleri için test yöntemlerinin listesi [25].

	Metot	Birim	Tipik değer aralığı		Özellik
			Minimum	Maksimum	
1	Slump yayılma testi	mm	650	800	Boşluk Doldurma
2	T500 yayılma testi	s	2	5	Boşluk Doldurma
3	J-halkası	mm	0	10	Geçme yeteneği
4	V-hunisi	s	6	12	Boşluk Doldurma
5	Zaman artışı V hunisi T 5 dakika	s	0	3	Segregasyon direnci
6	L-kutusu	(h2/h1)	0,8	1,0	Geçme yeteneği
7	U-kutusu	(h2-h1) mm	0	30	Geçme yeteneği
8	Doldurma kutusu	%	90	100	Geçme yeteneği
9	GTM (Elek ayrışma direnci)	%	0	15	Segregasyon direnci
10	Orimet	s	0	5	Boşluk Doldurma

2.6.1. Doldurma yeteneği

Doldurma yeteneği, KYB'nin dışarıdan hiç müdahale olmadan kendi ağırlığı altında deforme olması ve şekil değiştirme özelliği ile açıklanabilir. Betonun kendi ağırlığı altında ne kadar uzağa yayılabildiği ve bu uzaklığa ne kadar sürede ulaştığı ile doğrudan ilgilidir. Doldurma yeteneği kavramı kimyasal katkı kullanımına, su/çimento oranına, tanecikler arası sürtünmeye bağlı olarak ince ve kaba agrega hacmine, maksimum tane boyutuna bağlı olmak üzere agrega granülometrisine bağlıdır [46].

KYB'nin kendi ağırlığı altında hareket ederek bulunduğu kalıba hiçbir boşluk bırakmaksızın yerleşen ve dolabilen bir betondur tanımında olduğu gibi doldurma kabiliyetine direk olarak atıf yapılmaktadır. KYB'nin doldurma yeteneği betonun işlenebilirliği ile doğrudan bağlantılıdır. Betonun plastik viskozitesinin ve akma gerilmesinin düşük olması istenir [14].

Doldurma yeteneğini doğrudan etkileyen özelliklerden bir tanesi de KYB'yi oluşturan malzemelerin taneleri arasında ki sürtünmeyi aza indirmektedir. Bu indirgeme süperakışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanarak yüzey geriliminin düşürülmesi ve filler malzeme kullanılarak karışımda kullanılan ince malzemelerin etrafını sarmakla mümkün olabilmektedir [8].

Çökme yayılma deneyi, T500 deneyi, V hunisi deneyi, Orimet deneyi KYB'nin doldurma yeteneğini belirlemek için kullanılan test yöntemleridir.

2.6.2. Ayrışmaya Karşı Direnç

Bir KYB karışımı üretilirken tekdüzelik ve ayrıma karşı direnç çok önemlidir. Agrega ve çimento malzemesi tarafından absorbe edilmeyen su miktarının en aza indirilmesi, ayrımı önlemek için önemlidir. Segregasyon (Ayrışma), ince ve kaba malzemelerin betonda dağılarak homojen bir yapı oluşturmamasıdır. Betonun normal akışında ayrışma olmaması beklenir. KYB'de ise hem karışma sonrasında

hem de akış halinde karışım içinde bulunan malzemelerde ayrışma istenmez. Ayrışma meydana gelen haller aşağıda genel hatları ile belirtilmiştir.

- Terleme
- Kaba ve ince agreganın çimento hamuru fazından ayrışması
- Sık donatılı yerlerde kaba agreganın ayrışması
- Hava boşluğunun homojen olmaması

Ayrışma karışım içinde ince malzemeler kullanılarak, su oranına dikkat ederek, viskozite düzenleyici katkıları kullanılarak önlenabilir [46].

KYB üniformaluluğunu korumalı ve segregasyon oluşmaması için yeteri kadar direnci gösterebilmelidir. Bunun sağlanması için beton harcının karışım içinde yeteri kadar yer alması sağlanmalıdır.

V hunisi T5 dakika deneyi, GTM ekran kararlılık deneyi KYB'nin ayrışmaya karşı direncini belirlemek için kullanılan test yöntemlerindendir.

2.6.3. Geçme Yeteneği

Bir betonun KYB olarak tanımlanabilmesi için en önemli parametrelerden birisi de geçiş yeteneğidir. Bir KYB doldurma ve ayrışmaya karşı direnç yeteneği olsa bile geçiş yeteneğine sahip olmayabilir. Max. agrega çapı ve kaba agrega/ince agrega oranı yüksekse geçiş yeteneğinde problemler görülmeye başlanır. Geçiş yeteneğine katkı sağlamak için viskoziteyi artırmak, düşük su/çimento oranı, uygun agrega kullanımı, ideal kaba/ince agrega oranı belirlenmelidir [46].

Geçebilme kabiliyeti, kalıp içerisinde sabit bulunan donatılar arasında ayrışma olmadan geçebilme yeteneğiyle ilgilidir. Daha sık donatılı alanlarda kaba agreganın hacmine oranla, hamur fazın hacminin daha çok olması istenir.

L kutusu deneyi, U kutusu deneyi, J halkası deneyi KYB'nin geçiş yeteneği hakkında fikir sahibi olabilmek için uygulanan test yöntemlerindendir.

2.6.4. Taze Haldeki KYB ile İlgili Deney Yöntemleri

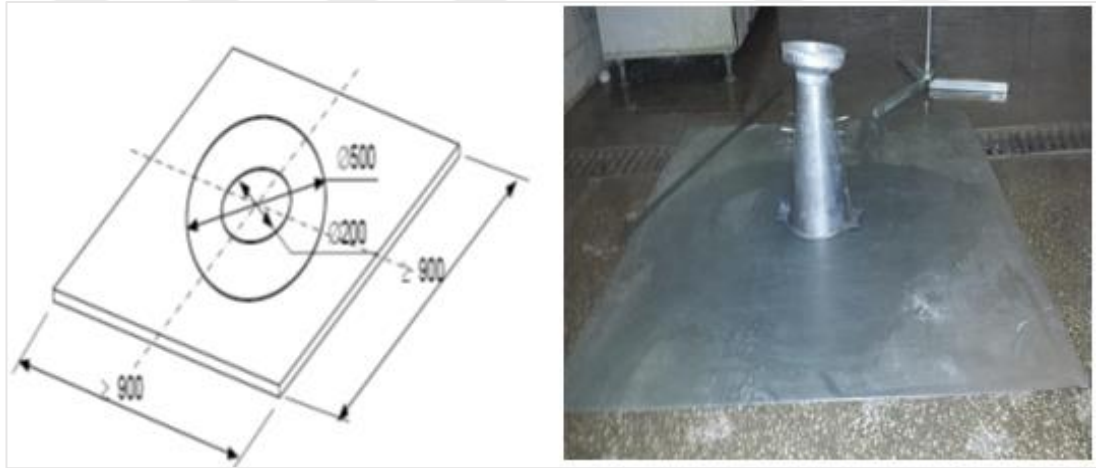
TS EN 206-1’de normal beton kıvamları ile ilgili kıvam sınıfları verilmesine karşın, KYB için tarif edilmiş herhangi bir bilgi yoktur. 2016 yılının mart ayında güncellenen ve yayınlanan TS 802’de ise KYB için geniş bir yer ayrılmıştır. KYB’nin tarifinde doldurma kabiliyeti, geçme kabiliyeti, ayrışmaya karşı dirençten söz edilir. Bu değerlerin, belirli bir sınır içerisinde kalması beklenir ve bunun için bazı deney metotları geliştirilmiştir. Bu deneylere ait sınır değerler ve uygunluk kriterleri aşağıda Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5. KYB’nin özellikleri için uygunluk kriterleri [28].

Özellik	Ölçüt
Çökme-akma sınıfı SF1	$\geq 520\text{mm}, \leq 700\text{mm}$
Çökme-akma sınıfı SF2	$\geq 640\text{mm}, \leq 800\text{mm}$
Çökme-akma sınıfı SF3	$\geq 740\text{mm}, \leq 900\text{mm}$
Hedef değer olarak belirlenen çökme-akma değeri	Hedeflenen değerden en fazla ± 80 mm fark
V-hunisi sınıfı VF1	$\leq 10\text{s}$
V-hunisi sınıfı VF2	$\geq 7\text{s}, \leq 27\text{s}$
Hedef değer olarak belirlenen V-hunisi	$\pm 3\text{s}$
L-kutusu sınıfı PA1	$\geq 0,75$
L-kutusu sınıfı PA2	$\geq 0,75$
Hedef değer olarak belirlenen L-kutusu	Hedeflenen değer 0,05 azından olmamak kaydıyla
Elek ayrışma direnci sınıfı SR1	$\leq \% 23$
Elek ayrışma direnci sınıfı SR2	$\leq \% 18$

2.6.4.1. Çökme Yayılma ve T 500 süresi deneyi

Çökme yayılma ve T 500 süresi deneyi KYB' un akıcılığını ve akış hızı süresinin herhangi bir engelle karşılaşmadan test etme yöntemidir [35]. Esasları TS EN 12350-2' de belirtilen standartlara dayanmaktadır. Çökme yayılma deneyinde standart çökme hunisi ve çap sınırları sırasıyla tabla üzerinde işaretlenmiş yayılma tablası kullanılır. Çökme hunisi yatay bir şekilde düz bir zemine yerleştirilen, kalınlığı en az 2 mm olan ve yüzey alanı en az 900mm*900 mm olan yayılma tablasının merkezine konumlandırılır. Beton çökme hunisine herhangi bir sıkıştırma uygulanmaksızın doldurulur. Çökme hunisi kaldırılarak betonun tablada kendi ağırlığı ile ne kadar yayıldığı, birbirine 2 dik noktadan D1 ve D2 yayılma çapları ölçülerek kaydedilir. D1 ve D2 yayılma çaplarının aritmetik ortalaması yayılma çapı olarak anılır. Yayılma çapının 550-850 mm arası beklenir ve bu değerler arasında SF1,SF2,SF3 olarak sınıflandırılırlar [47]. T 500 süresi ise tabla üzerinde işaretli 500 mm sınırına betonun kaç saniyede ulaştığı, 0,1 saniye hassasiyetle ölçüm yapan kronometre ile ölçülüp kaydedilmesiyle bulunur. Yayılma süreleri VS1 ve VS2 olarak sınıflandırılır.

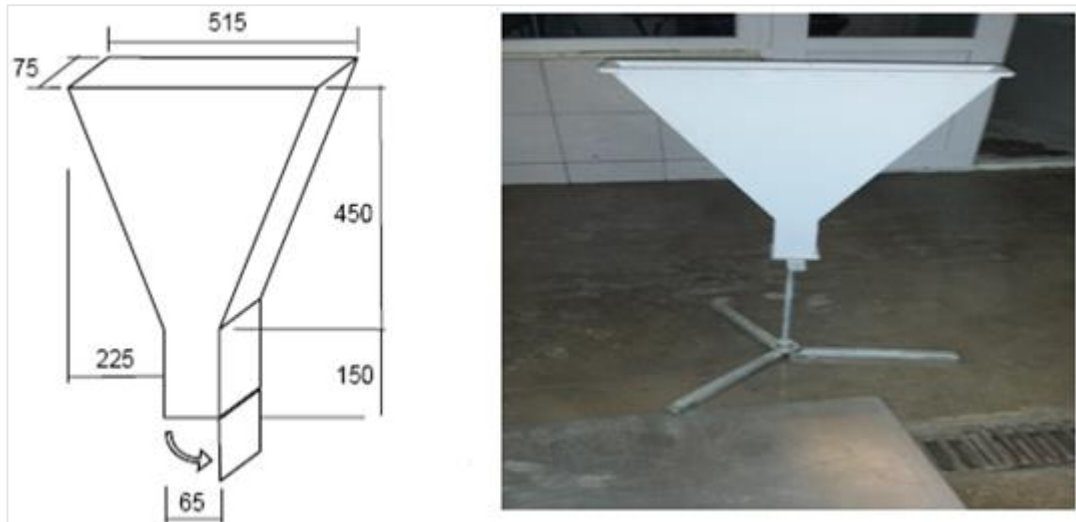


Şekil 2.8. KYB'da çökme-yayılma deneyi aparatları

2.6.4.2. V hunisi deneyi

V hunisi deneyi KYB'nin boşluklardan geçebilme yeteneğini ölçmek için ve betonun viskozitesi hakkında fikir elde edebilmek için kullanılır. V hunisi en az 12 litre hacminde yüzeyleri düzgün, betonla herhangi bir reaksiyona girmeyecek ve paslanmayacak metalden imal edilmiştir. V hunisin alt tarafında betonu boşaltmak için 65 mm x 65 mm ölçülerinde kare şeklinde bir kapak bulunur.

V hunisinin üst yüzeyine kadar taze beton, herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmaksızın doldurulduktan sonra, beton üst yüzeyi, huni üst seviyesi ile aynı hizaya kadar düzeltilir. V hunisi aparatının altına dökülen betonu muhafaza etmek için bir kap konulur. Doldurma işlemi bittikten sonra 10 ± 2 sn beklenilerek, V hunisinin kare şeklindeki kapağı açılır ve beton kendi ağırlığı altında boşalmaya bırakılır. Alttaki kabın ilk görüldüğü ana kadar geçen süre 0,1 saniye hassasiyetle ölçüm yapan kronometre ile ölçülüp, t_v hesaplanıp kaydedilir. Betonun V hunisinden, alttaki kaba geçiş süresi t_v , betonun akma süresi olarak belirlenir. Betonun akma süreleri VF1 ve VF2 olarak sınıflandırılır.

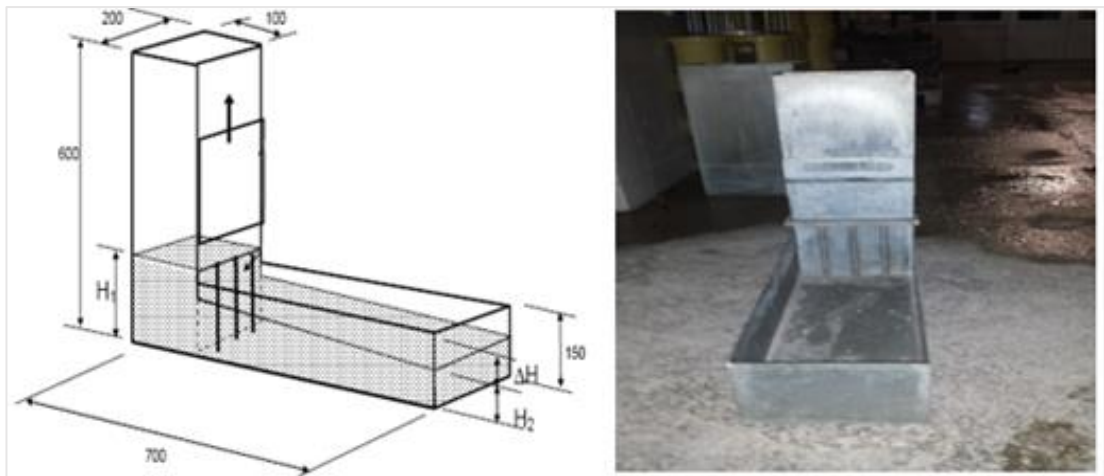


Şekil 2.9. V hunisi deneyi aparatları

2.6.4.3. L kutusu deneyi

L kutusu deneyi KYB'nun donatı çubukları arasından herhangi bir segregasyona uğramadan geçme yeteneği hakkında fikir verir. L kutusu 12,6-12,8 lt hacminde yüzeyleri düzgün, betonla herhangi bir reaksiyona girmeyecek ve paslanmayacak metalden imal edilmiştir. L kutusu yatay ve dikey bölmeler olmak üzere ve birbirine geçen iki bölmeden ve beton transferi için bir adet kapıdan oluşur. L kutusunda donatı düzenekleri iki çubuklu ve üç çubuklu olarak imal edilebilir. 2 donatı çubuklu deney düzeneğinde, donatı çapı 12 mm ve donatı aralıkları 55 mm düzgün yüzeyli çubuklar kullanılır. 3 donatı çubuklu deney düzeneğinde donatı çapı 12 mm ve donatı aralıkları 41 mm düzgün yüzeyli çubuklar kullanılır [47].

Taze beton L kutusunun dikey bölümünün üst yüzeyine kadar herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmaksızın doldurulduktan sonra beton üst yüzeyi, L kutusunun üst seviyesi ile aynı hizaya kadar düzeltilir. Doldurma işlemi bittikten sonra 60 ± 10 sn. beklenildikten sonra transfer kapısı açılarak taze betonun donatı çubukları arasından kendi ağırlığı ile yatay kısma ilerlemesi beklenir. Betonun ilerlemesi durduğunda yatay kısımdaki betonun yüksekliği 3 noktada ölçülerek ortalaması alınır ve H_2 olarak kaydedilir. Dikey kısımda ise transfer kapağının arkasındaki beton yüksekliği aynı metotla ölçülür ve H_1 olarak kaydedilir. Betonun geçme oranı H_2/H_1 ile ölçülür. Betonun geçme süreleri PA1 ve PA2 olarak sınıflandırılır.



Şekil 2.10. L kutusu deney aparatları

2.7. Sertleşmiş Halde KYB ve Özellikleri

2.7.1. Basınç Dayanımı

Betonun dayanımı, üzerine gelecek eksenel yüklerin meydana getireceği şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı, betonun göstereceği maksimum direnme diye tarif edilir. Sertleşmiş beton özellikleri arasında betonun basınç dayanımı en çok kullanılan ve aranılan özellikler arasındadır. Bunun nedenleri,

- Betonun kullanıldığı yapılar da genellikle basınç eğilme gibi kuvvetlerin doğrudan etki ettiği için dayanımı bilmenin, taşıma kapasitesi hesabında yardımcı olması
- Deneysel olarak betonun diğer özelliklerine göre daha kolay yapılabilir olması
- Betonun diğer özellikleriyle arasında ilişki kurulabilecek bir değer olmasıdır [48].

Yapılan çalışmalar sonucunda betonun yaşı boyunca ulaşabileceği basınç dayanımının %70'ine 28. günde ulaştığından, yapılan dizayn ve proje çalışmaların da betonun 28. gündeki basınç dayanımı esas alınır.

Betonun dayanımı, betonun kompozisyonuna, kür ve ortam koşullarına, betonun yaşı ve olgunluğuna bağlıdır. Beton kompozisyonun dayanımına etki eden faktörleri şöyle sıralanabilir; Karışımın s/ç oranı, beton suyunun kalitesi, çimento özellikleri, agrega özellikleri, betonun karılma, taşınma yerleştirme, sıkıştırma gibi işlemleri, mineral ve kimyasal katkıların özellikleri ve miktarları [48,49].

Karışımlarda kullanılacak olan çimento miktarı ile dayanım arasında doğrusal bir ilişki kurulabilir. Çimento dozajının artmasıyla çimento hamurunun hacmi artar. Herhangi bir tesir altında, çimento hamurunda oluşacak gerilmeler daha küçük olup, betondan daha büyük dayanımlar elde edilebilir. Çimentonun 500 kg/m³'ün üzerinde kullanılması ise rötreye neden olacağından ve iri agregaların birbirleri ile olan teması ve yük aktarımını etkileyeceğinden basınç dayanımında azalma görülür. KYB'ler

yüksek dayanımlı beton sınıfına girmektedir. Bu sebepten dolayı hedeflenen dayanımın yakalanması için çimento miktarı göz önüne bulundurulması gereken önemli bir parametredir. Aynı zamanda KYB’de kullanılacak olan toz malzemenin cinside dayanım sınıfının belirlenmesinde önemli rol oynar. Farklı tip toz malzemelerin aynı anda kullanılması basınç dayanımını ilişkilendirmeler de problemlere yol açar. Dayanım sınıfı ve s/ç arasında bir ilişki kurulabilmesi için sabit bir toz malzemenin kullanılması gerekmektedir [19,49].

Kompasite de betonda önemli ölçüde basıncı etkileyen faktörlerden biridir. Kompasitenin düşük olması betonda ki boşlukların fazla olması demektir. Boşluk oranının fazla olması betonda basınç dayanımını olumsuz etkiler. Betonda ki boşlukların genellikle iri agrega ile çimento hamuru arasında olduğu düşünülür, aderans azalır ve dayanım düşer. KYB’de ince malzemelerin içeriğinin fazla olması sonucu kompasite yüksek olacağından, iyi sıkışma ve iyi yerleşmeden dolayı yüksek basınç dayanımları beklenmektedir [49].

2.7.2. Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı sonuçları betonun gerilme dayanımı hakkında fikir veren sonuçlarından birisidir. Deneylerde genellikle kare kesitli elemanlar kullanılmaktadır. Eğilme ilgili standartlar merkezden yükleme ve 2 noktadan yükleme olmak üzere iki başlık altında incelenir. ASTM C 293’de L/2 uzaklığında yükleme yapılması ile ilgili deney standartlarını açıklarken, ASTM C 78 L/3 uzaklığında her iki taraftan yükleme yapılması ile ilgili deney standartlarını açıklar.

Eğilme dayanımı ile diğer dayanımlar arasında da çeşitli çalışmalar sonucu bağıntılar kurulmuştur. Basınç dayanımının gelişmesine ve kullanılacak olan agrega tipi ve şekline göre değişkenlik göstermekle birlikte, eğilme dayanımının, basınç dayanımının yaklaşık %10 ile %20’si arasında bir değer olarak saptanmıştır. Çalışmada kullandığımız Şekil 2.11’de gösterilen tek noktadan yükleme ile yapılan eğilme deneyinin sonuçları, çift noktadan yapılan deney sonuçlarına göre daha

yüksek çıkmaktadır. 3 noktalı eğilme dayanımı hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılır.

$$\sigma_e = \frac{M_c}{W} \qquad \sigma_e = \frac{3PL}{2bh^2}$$

σ_e = Eğilme dayanımı (N/mm²)

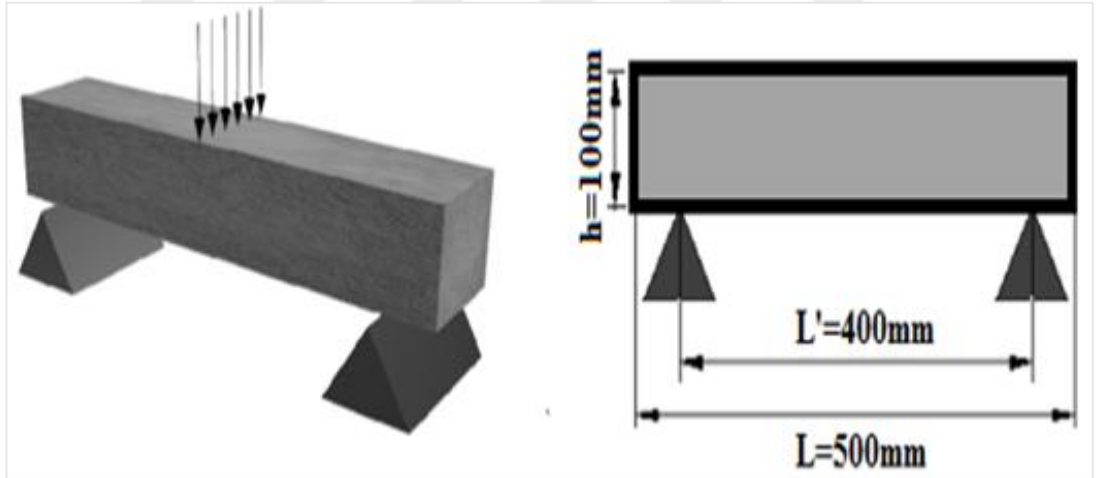
M_c = Maksimum moment

W = Mukavemet momenti

P = Yük (N)

L = Mesnetler arası uzaklık (mm)

b, h = Kesitin eni ve yüksekliği (mm)



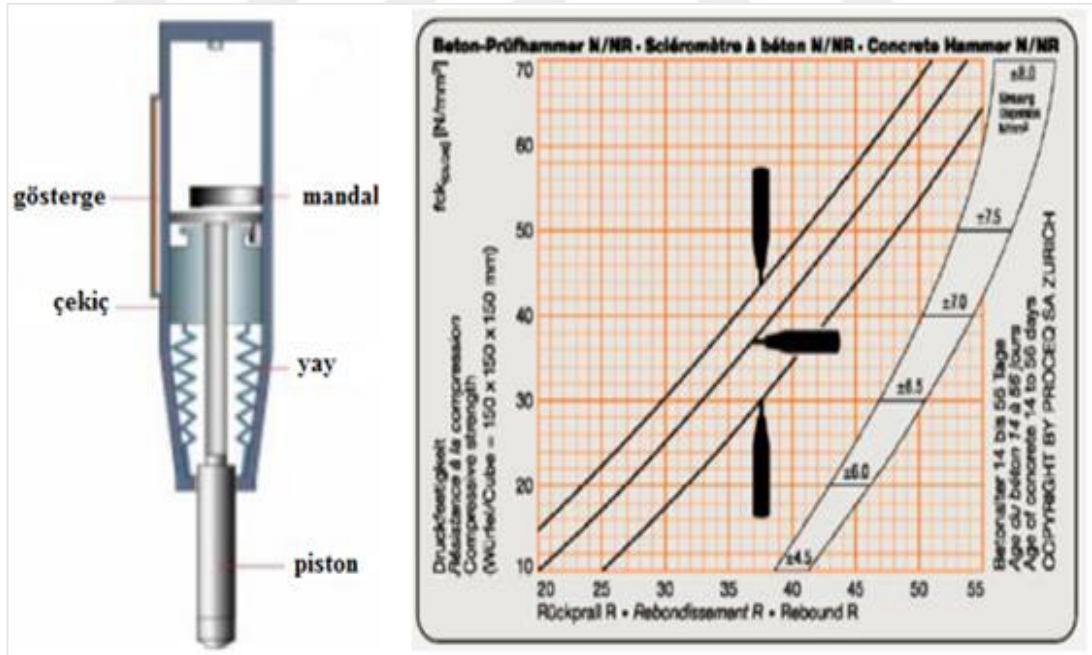
Şekil 2.11. 3 noktalı eğilme deneyi

2.7.3. Schmidt Yüzey Sertliği

Basınç dayanımı tayini beton kalitesini yargılamak için kullanılan ana ölçütlerden birisi haline gelmiştir. Betonun basınç dayanımını tayin etmek için ise tahribatlı ve

tahribatsız olmak üzere çeşitli test yöntemleri geliştirilmiştir. Bu testlerin amacı beton üretimini kontrol etmek ve servis yükleri altında betonun dayanım değişikliğini belirlemektir. Mevcut tahribatsız yöntemler arasında schmidt çekici deneyi, basitlik, taşınabilirlik, düşük maliyetli ve tahribatsız oluşu, hızlı sonuç alınabilirliği gibi avantajları ile pratikte en sık kullanılan test yöntemlerinden biri olmuştur [51].

Sertleşme koşulları, agregası tipi, yüzey sertliği, beton kompozisyonu, betonun nem içeriği, numune şekil ve boyutu, karbonatlaşma, beton içindeki boşluk ve donatı oranı, vuruş açısı schmidt çekici sonuçlarını etkileyen faktörlerdir. Bunlardan dolayı test çekicinde kalibrasyon ve vuruş açısı çok önemli yer tutar. Test çekici, belirli kalibre koşullarıyla beton basınç dayanımı hakkında fikir edinilmesini sağlarken, Şekil 2.12’de görüldüğü gibi vuruş açısına göre farklı geri tepme sayılarıyla karşılaşılmaktadır. Beton kalitesini dolaylı olarak tahmin etmekte kullanılan, tek başına yeterliliği tartışılmakta olan bu yöntem, aynı karışımlarda kullanıldığında daha doğru sonuçlar vermektedir [52,53].



Şekil 2.12. Schmidt çekici ve uygulama yönüne göre değişen f_{ck} ile geri tepme sayısı arasında korelasyonu gösteren bir grafik [53].

2.8. Dayanıklılık (Durabilite)

Yapıların ve yapılarda kullanılan yapı malzemelerinin tasarım aşamasında belirlenen servis ömürleri vardır. Yapıların bu servis ömrü boyunca işlevselliklerini korumalarına dayanıklılık denir. Dayanıklılık aynı zamanda durabilite veya kalıcılık olarak da tanımlanmaktadır. Betonun son 20-30 yılda tanımı ve algısı değişmeye başlamıştır. Önceleri betonlar, yalnızca yüksek basınç dayanımı ile tarif edilirken, son zamanlarda uzun süreli dayanıklılık ifadeleri de betonda kullanılmaya başlanmıştır. Betonun çok farklı alanlarda ve değişik amaçlarla kullanılması bu konuyu daha güncel hale getirmiştir.

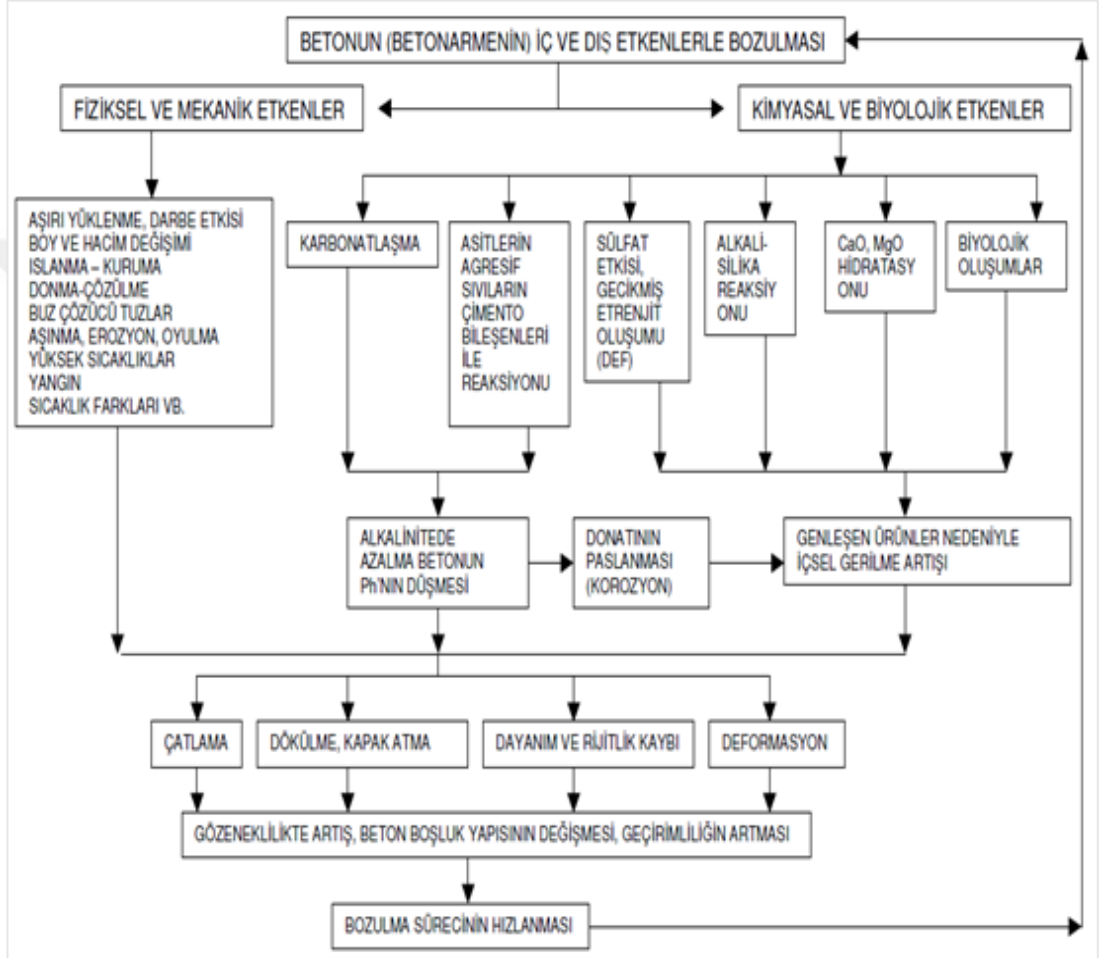
ACI 318 ve EN 1992’de yapıların servis ömrü boyunca karşılaşılabilecek olan iç ve dış etkenlere göre yapı tasarımı yapılmaktadır. TS 500’de ise durabilite konusu dolaylı olarak alt başlıkların içinde vurgulanmaktadır [54].

İnşaat mühendisliği uygulamalarında bir yapının projelendirmesinde 5 ana kriter göz önünde bulundurulur. Bunlar dayanım, dayanıklılık, işlevsellik, ekonomi ve estetikdir. Betonun istenen bütün özellikleri bünyesinde barındırması ile nitelikli bir beton elde etmek için çevre ve kullanım koşullarının da göz önünde bulunduran bir tasarım hedefi, üretim aşamalarının denetlenmesi ve kalite kontrolünün yapılmasına bağlıdır [55,56].

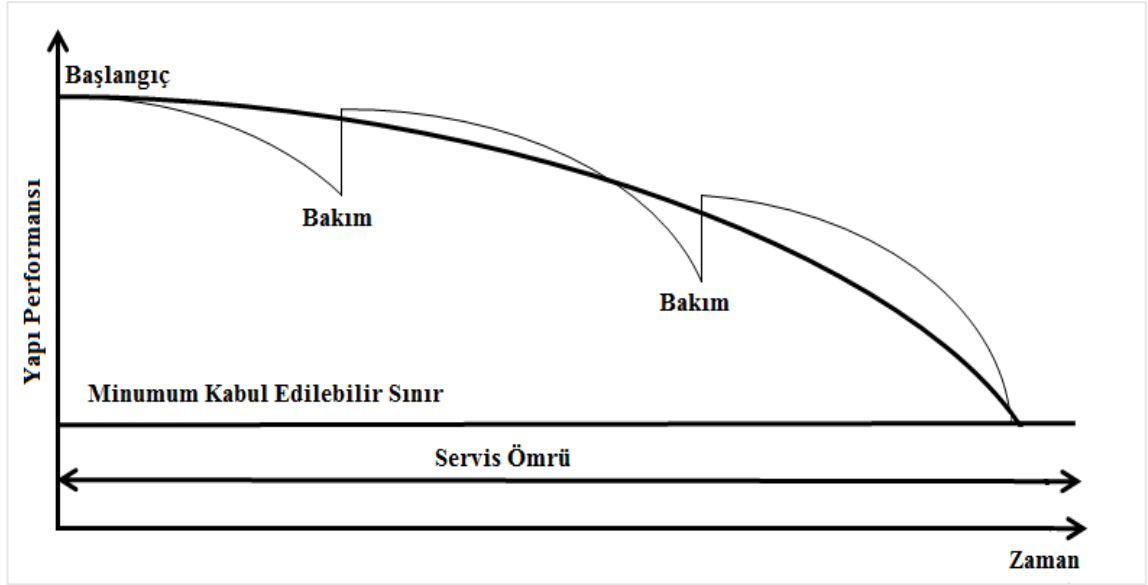
Betonun zaman içinde hedeflenen performansı göstermesi kalıcılığına da bağlıdır. Günümüzde yeterli dayanım şartı kriterlerini yerine getiren betonun, dayanıklı bir beton olacağı ve yalnızca yapısal kaygılar güderek dayanıma önem verme görüşü, zaman içinde terk edilmiştir. Yapının hedeflenen servis ömrü boyunca işlevsellik özelliğini yerine getirmesi için, tasarım aşamasında yıpratıcı etkilerin, tekrarlı-tekrarsız iç ve dış mekanizmaların, aynı anda birden fazla etkiye maruz kalmaları da göz önünde bulundurulmalıdır [55]. Beton veya betonarmenin iç ve dış etkenlere bağlı olarak bozulmasına etki eden faktörler Şekil 2.13’de gösterilmiştir.

Beton, kullanılacağı yapısal sistem koşulları ve gerekli denetim mekanizmaları uygulanarak üretilmişse, servis ömrü boyunca daha az onarım ile karşılaşacaktır.

Ancak çeşitli iç ve dış reaksiyonlar sonucu betonun performansında düşüşler gözlemlenebilir. Dayanıklılık betonun daha uzun kullanılmasına yardımcı olduğu gibi, yapı ömrü boyunca bakım ve tamir masraflarını azaltarak ekonomik yönde katkı yapar. Aynı zamanda betonun dayanım artışına da olumlu yönde katkı yapar [57,58]. Bir yapının zamana bağlı performansının değişimi Şekil 2,14’de verilmiştir.



2.13 Beton veya betonarme yapıların iç ve dış etmenlerle bozulması [59].



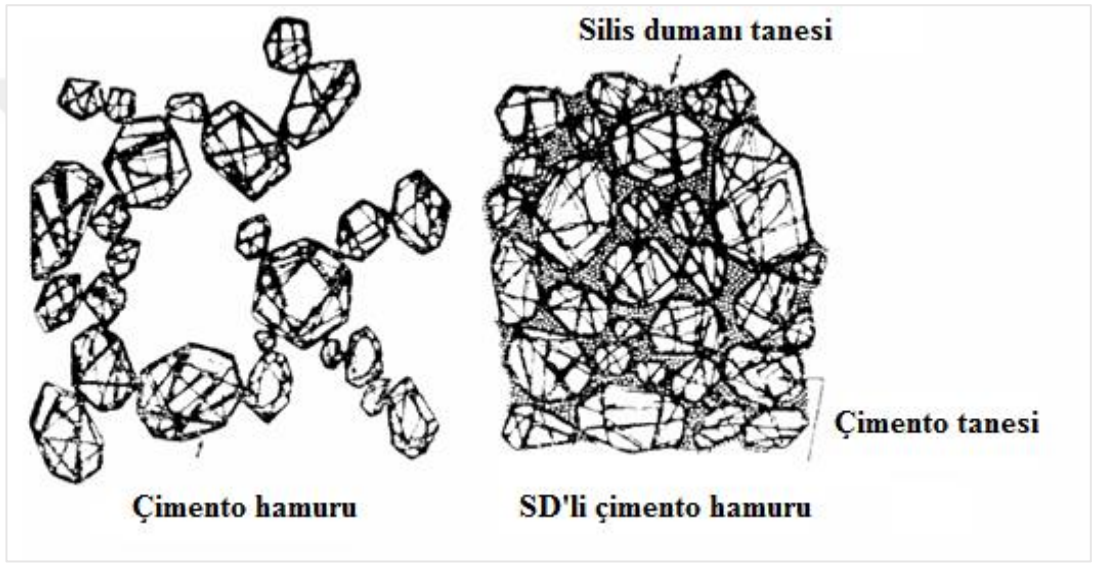
Şekil 2.14. Yapı performansının zaman içerisinde değişimi [56].

Betonun durabilitesinde göz önüne alınacak en önemli etkenlerde biride, betondaki boşluk hacimleri ve yapısıdır. Betondaki boşluk oranı, geçirimliliği etkileyen ana parametrelerden birisidir. Geçirimliliği fazla olan bir betonun durabilitesinden de söz edilemez [60]. Çimento hamurunun sertleşmiş haldeki durumu bazik bir yapıya sahip olmasından dolayı, beton asidik çevre koşullarına maruz bırakıldığında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu betonun bünyesinde hasarlar meydana gelir. Bu tip ortamlarda durabilitenin etken olabilmesi için geçirimlilik önemli hale gelmiştir [9].

Dayanıklılık için alınacak önlemler 3 genel başlık altında toplanabilir.

- Dayanıklılık problemlerinde ana etken olan su, su içerisinde taşınan zararlı maddeler ve gazlar beton bünyesinden uzaklaştırmalı, kaliteli ve geçirimsiz bir beton üretilmeli
- Yapıların karşılaşıcağı problemleri dizayn aşamasında belirleyerek uygun malzeme seçimi yapılmalı
- Yapı imal edildikten sonra suyun yapıdan korunmasını sağlanmalı, nem önlenmeli ve şiddetli çevre etkilerini yapıdan izole edilmelidir [55].

Betonun geçirirnilikliğini azaltmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Düşük su/bağlayıcı kullanmak, uçucu kül, yüksek fırın cürüfları ve silis dumanı gibi mineral katkıları kullanmak bu yöntemler arasında sayılabilir. Son yıllarda KYB betonu da dahil olmak üzere tüm betonlarda uçucu kül kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Uçucu kül kullanarak işlenebilirlikte iyileşme, su miktarını azaltma, hidrasyon ısısında kontrol, geçirirnililikte azalma ve durabilite de iyileşme sağlanır. Aynı zamanda çevreye verilen zararı da azaltmaktadır. Şekil 2.15'te silis dumanının boşlukları doldurma mekanizması gösterilmiştir [61].



Şekil 2.15. Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi [62].

KYB'nin sertleşmiş haldeki özellikleri, geleneksel betonlara göre kıyas edildiğinde, basınç dayanımının yüksek olması, daha az boşluklu olması, daha az geçirirnil olduğu için kalıcılık özellikleri daha gelişmiştir. KYB'lerin daha homojen olması, segregasyona karşı gösterdiği direnç, herhangi bir sıkıştırmaya gerek kalmadan yerleşmesi gibi özellikleri, agrega ile çimento hamuru arasında ki yüzeylerin gelişmesine katkıda bulunarak, KYB'nin kalıcılık, yüksek dayanım ve mikro yapısında etkili olur ve servis ömrü boyunca daha iyi bir hizmet vermesine yardımcı olurlar [63].

Uygun yerleştirme, taze betonun kürü, betonun iç yapısı, azaltılmış kusurlar ile yüzey kalitesi daha iyi yapılar yapmak kritik bir öneme sahiptir. Geleneksel betonların yerleştirilmesi esnasında kullanılan mekanik konsolidasyon yöntemleri nedeniyle sıkıştırma enerjisi uygulama esnasında tekdüzelik olmadığı için, kesintili bir süreç olarak yapı boyunca düşük ve düzensiz bir yüzey kalitesi oluşur ve yapıların dayanıklılık performansında azalmalar görülür. KYB'lerin ise ince gözenekli ve daha iyi mikro agresif ajanlara sahip olması ve düşük geçirgenliğe sahip olması nedeniyle çevresel, kimyasal vb. saldırılara karşı daha yüksek direnç sağlayarak, zayıf noktaları daha az homojen bir yüzey tabakası oluştururlar [63].

2.8.1. Sülfat Etkisi

Sülfat saldırısı betonda durabiliteyi etkileyen önemli reaksiyonlardan birisidir. Sülfatlar beton içerisinde bulunan bazı bileşenler ile tepkimeye girerek betonun kalıcılık özelliklerine zarar verir. Sertleşmiş betonun içerisindeki bileşenlerle sülfat iyonlarının reaksiyona girmesi sonucu etrenjit ve alçı taşı meydana gelir. Bu yan ürünler betonda genleşme, çatlama ve bozulmaya yol açar. Betonun basınç dayanımında azalma görülür. Fiziksel görünümünde ise özellikle betonun köşelere yakın kenarlarında, sivri noktalarında beyaz lekeler, dağılma ve dökülmeler, çatlaklar meydana gelir [55].

Kuru halde bulunan tuzların betona çok zarar verdiği söylenemez ancak su ile birlikte meydana getirdikleri reaksiyonların beton üzerinde büyük etkileri vardır. Suyun, iyonların beton içerisine taşınmasında önemli bir rolü vardır. Yer yüzeyine yakın kısımlar da Na_2SO_4 'e daha fazla rastlanmasına karşın MgSO_4 'de birçok bölgede rastlanmaktadır [55].

Betonun sülfat direnci, zeminde veya suda bulunan sülfat iyonlarının konsantrasyonlarına bağlıdır. Bu sınıflandırmalar, devamlı durgun su ile temas eden betonlar için yapılmakta olup ıslanma-kuruma, basınç, sıcaklık, çarpma-sürtünme gibi olaylar etki derecesini artıracak ve betonun durabilitesine daha fazla zarar

verecektir. Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.7’de zemin suyu ve toprakta bulunan sülfat konsantrasyonlarının etki dereceleri sınıflandırılmaktadır.

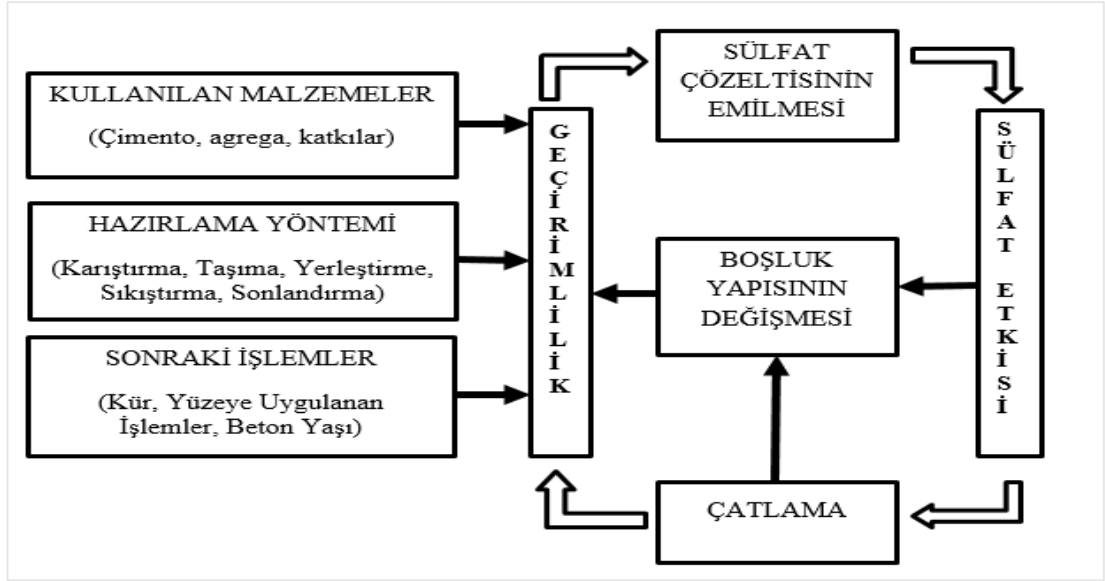
Çizelge 2.6. ACI 201’e göre sülfat etkisi açısından sınıflama [56].

Sülfat Ortamı	Topraktaki suda çözünebilir (SO_4^{2-}) miktarı (%)	Sudaki (SO_4^{2-}) Miktarı (mg/l)
İhmal Edilebilir	0,00-0,10	0-150
Orta	0,00-0,20	150-1500
Şiddetli	0,20-2,00	1500-10000
Çok Şiddetli	>2,00	>10000

Çizelge 2.7. TS 3440’a göre sülfat iyonlarının zararlı etkinlik sınıflamaları [56].

Etkinlik Derecesi	Suda (SO_4^{2-}) miktarı (mg/l)	Zeminde (SO_4^{2-}) miktarı (mg/kg)
Zayıf	200-600	2000-5000
Kuvvetli	600-3000	>5000
Çok Kuvvetli	>3000	

Geçirimlilik ile sülfat dayanıklılığı arasında diğer kalıcılık özelliklerinde olduğu gibi doğrudan bir ilişki ve bir döngüden söz edilebilir. Beton sülfat direncine maruz kaldıkça geçirimlilik artar, geçirimlilik arttıkça daha fazla sülfat direncine maruz kalır. Şekil 2.16’da bu döngüden bahsedilmektedir.



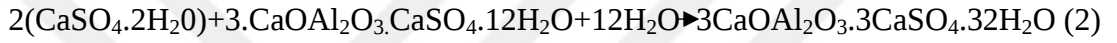
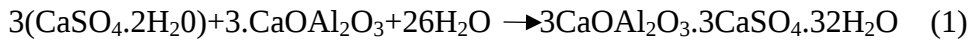
Şekil 2.16 Sülfat direnci ile betonun geçirimliliği arasındaki ilişki zinciri [56].

Sülfatın zaman içerisinde gelişimini etkileyen faktörler;

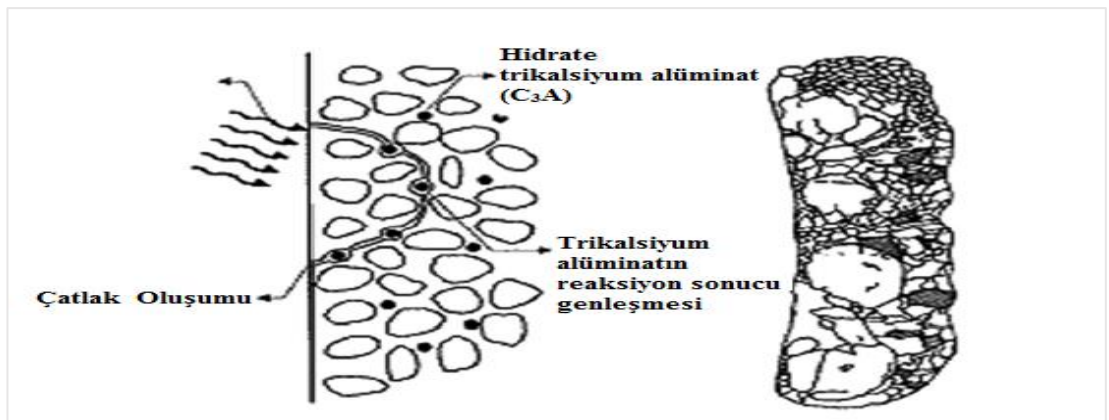
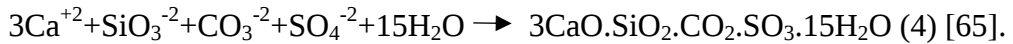
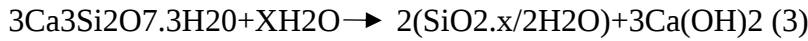
- SO_4^{-2} içeriği ve ortam koşulları
- Betonun geçirimliliği
- Betonun yapısı
- Suyun varlığı

Magnezyum sülfat ile sodyum sülfatın etkileri karşılaştırıldığında her ikisi de alçı taşı oluşumuna ve yarı kararlı durumda ki ürünlerin etrenjit oluşumuna yol açtıkları söylenebilir. Ancak oluşan ürünlerin hacimlerinde farklılıklar görülür. MgSO_4 'ün reaksiyonları sonucu oluşan ürünlerin hacimleri daha büyüktür. MgSO_4 , Na_2SO_4 'den farklı olarak çimento hamurunda ki kalsiyum-silika-hidrat($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) jelleri ile de kimyasal bağ oluşturup betonun bir bileşeni olan çimentonun bağlayıcılık özelliklerini düşürmektedir. Ayrıca MgSO_4 'ün oluşturduğu magnezyum hidroksit (MH) beton içerisinde boşluklara yerleşmesi sonucu geçirimliliği azaltarak daha az genişmeye neden olur [64].

Alçıtaşının meydana gelmesinde ki ana etkenler kalsiyum hidroksit ve ortam koşullarından gelen sülfat iyonlarıdır. Kalsiyum hidroksitin varlık sebebi de çimento bileşenlerinden olan C_3S ile ilişkilendirilmiştir. C_3S/C_2S oranı yüksek olan çimentolarda durabilite ile ilgili problemler yaşanma oranı daha yüksektir. Bilimsel çalışmalar sonucu alçıtaşının, genleşme üzerindeki etkileri hala tam olarak açıklanamamıştır. Etrenjit oluşumunda ise sülfat iyonlarının betona nüfuz etmesiyle mevcutsa alçıtaşı, monosülfat veya C_3A ile reaksiyona girerek meydana gelir. Şekil 2.17’de sülfatın betonla teması gösterilmiştir. Etrenjitiin oluşma mekanizmaları aşağıda 1 ve 2 numaralı formüllerle formülize edilir [65].



Etrenjite sülfata maruz kalmayan betonlarda da rastlanabilir. Çünkü etrenjit hidratasyon ürünlerinden olup, priz dengeleme olayı ile ilişkilendirebilir. Tomasit ise Formül 3 ve 4’de formülize edilen, etrenjite benzeyen fakat bünyesinde Al_2O_3 içermeyen, SiO_2 içeren bir üründür. Genleşmeye etkisi, etrenjite nazaran daha azdır.



Şekil 2.17. Sülfatın betonla teması [66].

Literatür taramasında durabilite ile ilgili yapılan deneylerin bir çoğu laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Oysa ki arazi koşulların da betonlar kombine şeklinde birden fazla agresif saldırıya uğrayabilmektedir. Kombine şeklinde gerçekleşen etkileşimler, betonda bozulmayı ve bozulma oranı hızını daha fazla artırmaktadır. Örneğin, çevre koşullarında bir betona, aynı anda ASR etkisi, sülfat saldırısı, iç sülfat etkisi, karbonatlaşma, korozyon etki edebilmektedir. Ayrıca laboratuvar koşullarında beton numuneler herhangi bir gerilmeye maruz kalmadıklarından, gerçekte basınç ve eğilme kuvvetleri tesir eden betonların saldırılar altında davranışları tam olarak açıklanamaz. Bassuoni ve Nehdi (2009), yılında yaptığı çalışma da KYB'lerin eğilme yükü ve dönüşümlü kombine çevresel etkiler altında sülfat ataklarını incelemiştir. KYB'lerin döngüsel çevre koşulları ve eğilme yükü altında çimento matrislerinin içinde çatlamalara neden olduğu, bu çatlamaların KYB örneklerinin derinliklerine kadar ulaştığı gözlenmiştir. Bazı KYB'lerin kombine çevrim altında mühendislik özelliklerini koruyamadığı, hatta bazılarının testin daha erken aşamaların da başarısız olduğu gözlenmiştir [67].

Betonda sülfat saldırısını önlemek için;

- ASTM standartlarına göre C3A muhtevası %8 ve altında olan çimentolar sülfata orta dayanıklı, C3A muhtevası %5'in altında olan çimentolar ise yüksek dayanımlı olarak sınıflandırılmaktadır. Düşük C3A ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içeren çimentolar kullanılmalı ve planlanacak yapının konumuna göre özel çimentolar tercih edilmelidir.
- Çimento hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit (CH), sülfat saldırıların da önemli bir rol oynamaktadır. Mineral katkıları kullanarak, CH tüketimi sağlanarak, sülfat saldırısı aza indirgenebilir.
- Kimyasal katkıları ile s/ç oranının da değişiklikler yapılarak sülfat saldırılarında en önemli sorun olarak görülen betonun geçirimsizliği artırılmalıdır.
- Drenaj ile yapıyı sülfata karşı izole edilmelidir,
- Su emmesi düşük uygun agrega seçimi yapılmalı,
- Beton geçirimsizliği sağlanmalıdır.

2.8.2. İslanma-Kuruma

Köprüler, sulama yapıları, yollar ve tüneller gibi direkt çevre etkisine maruz kalan yapılarda bile 75-100 yıl gibi hizmet ömürleri beklemek, durabilite kavramının önemini ortaya koymaktadır. 1960'lı yıllarda geçirimsiz olarak tasarlandığı düşünülen bir betonun günümüzde geçirimli olduğu, fiziksel ve kimyasal mekanizmalardan etkilendikleri görülmektedir. İslanma-kuruma etkisi de durabiliteyi etkileyen en önemli mekanizmalardan birisidir. Deniz suyunun gelgit etkisiyle, yükselip alçalmasıyla, deniz kenarlarında ki betonlarda, liman ve deniz yapılarında, kesikli granülometriye sahip üstü açık spor sahalarında, sulama kanal ve kanaletlerin de bu çevrimlere daha çok rastlanmaktadır. İslanma-kuruma çevrimi etkisi altında ki betonlar, devamlı su içinde kalan betonlara göre daha fazla hasar ile karşı karşıya kalmaktadır. İslanma-kuruma çevrimlerinde meydana gelen olaylar, genellikle fiziksel olduğu için çimentonun kimyasal özellikleri ikinci planda kalır. Agregası seçimi çok önemli rol oynamaktadır. Agreganın yoğun ve su emme özelliğinin düşük olması istenir. Betonun geçirimsiz olması bu çevrimlerin etkisini azaltmada etkili parametrelerden biridir [69,70].

İslanma-kuruma çevrimleri betonun uğradığı agresif çevresel koşullardan birisidir. Dayanıklılık tasarımında, kritik bir parametre olarak kabul edilir. Çevrimler sırasında betonun iç neminde değişiklikler görülür. İslanma durumunda betonun iç ortamda ki nemi kısa bir süre içerisinde hızlı bir artış gösterir ve istikrarlı bir seviyeye ulaşır, bu betonun s/ç oranına da bağlıdır. Beton ıslanma olayından sonra kurumaya maruz bırakıldığında ise iç bağıl nem hemen düşmez yavaş yavaş aşamalı bir şekilde azalır. Betonun nem içeriği, büzülme ve büzülme çatlaklarını değerlendirmek için önemli bir parametredir. Çoğu araştırmada ıslanma-kuruma döngüleri ile ilgili betonda kimyasal iyon girişine ve korozyona odaklanılmıştır. Bununla birlikte çok az çalışmada çevrimler sırasında, rötre performansı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çevrimler esnasında betonun büzülmesi ve genleşmesi periyodik olarak değişir [71]. İslanma-kuruma döngüleri betonlarda eksenleri boyunca gerilme ve şekil değiştirmelerine yol açar. İslanma-kuruma mekanizmasının betonlar da meydana getireceği etkiler ortamın sıcaklığına, nemine, ıslanma ve kuruma anındaki suyun ve etkiye maruz kalan betonun sıcaklığına bağlıdır. Betonun kuruma anındaki sıcaklığı

ile ıslatan suyun sıcaklığı arasındaki fark arttıkça çevrim etkinliği daha fazla artar [72].

Betonda ıslanma-kuruma çevrimlerinde meydana gelen etkiler şöyle sıralanabilir.

- Beton bünyesinde bulunan malzemelerden bazılarının düşük karbonatlı sular tarafından yıkanarak çözülmesi sonucu kütleden uzaklaşır.
- Agresif sıvıların, beton içerisinde bulunan çimento bileşenleri ile reaksiyon sonucu yıkanarak uzaklaştırılır ya da çözünmeyen bir yapı oluşturur.
- Betonlar bu çevrime maruz kaldığında beton boşluklarına eriyikliği düşük tuzların girmesi ve daha sonra saf suyun betondan uzaklaşması ile tuzların kristalleşmesi sonucunda hacimlerin artması sonucu genişterek betona zarar verirler.
- Islanma-kuruma döngüsü esnasında oluşan ısıl gerilmelerin betonda yarattığı etkiler [69].

2.8.3. Kılcallık

Betonda bulunan boşlukların cinsi ve hacimleri betonun durabilitesi ile yakından ilgilidir. Betona nüfuz eden suyun ve beton içerisinde istenmeyen zararlı maddelerin betona taşınımı bu boşluklar ve boşlukların birbirleriyle olan bağlantıları ile ilgilidir.

Kılcallık doymamış numunelerin içerisine, nem taşımanın bir göstergesidir. Betonun dayanıklılığı için önemli bir endeks olarak kabul edilmiştir. Betonda su ve diğer zararlı maddelerin nüfuz etmesini ve yüzeye yakın beton kalitesini ölçmeye yarayan bir yöntemdir. Kılcal geçirimlilik katsayısının betonun servis ömrünü tahmin etmede ve yapısal performansını geliştirmek için kullanılan bir yöntem olduğu ortaya konmuştur [73].

Kapiler su geçirimliliği betonun alt yüzey kısmından suyla teması halinde, küçük çaplara sahip kılcal boşluklar sayesinde, yerçekimi ivmesine karşın beton içinde suyun yükselmesine neden olur. Kapiler su geçirimliliği deneyi belirli bir alandan

suyla temas ettirilmesi ile birlikte suyun beton içinde kılcallık nedeniyle zamana bağlı şekilde yükselmesinin tespiti. Numunenin başlangıç ağırlık tespiti ile suyla temas ettikten sonra belirli zaman aralıkları ile ağırlık tespiti yapılarak, ağırlıkta meydana gelen artışlar belirlenir ve kılcallık katsayısı hesaplanır.

Kılcallığı beton içerisinde yer alan boşluklar dışında bu boşlukların çaplarının ne kadar olduğu, betonda kullanılan agreganın cinsi ve özellikleri, s/ç oranı, beton numunesinin boyutları, ortam ve kür koşulları, kür süresi etkilemektedir.

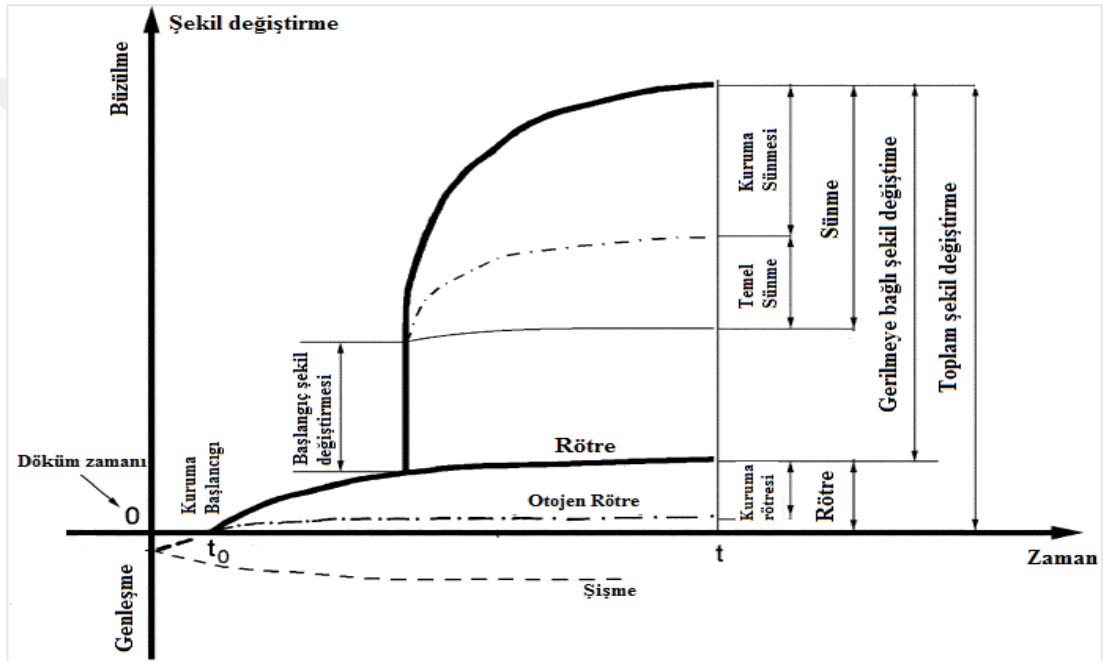
2.9. Rötire

Beton gözenekli bir çimento hamuru içerisinde birbirine bağlanmış ince ve kaba agregalardan oluşmuş kompozit bir malzemedir. Betonda ki suyun fiziksel ve kimyasal nedenlerle betonun bünyesinden uzaklaşması neticesiyle oluşan boy ve hacmindeki küçülmeye Rötire denir. Betonda rötreyi tanımlarken büzülme kavramı da kullanılmaktadır. Betonun taze özellik gösterdiği ve sertleşmiş durumda bulunduğu her iki evrede de rötire mekanizmaları görülür.

Hacim değişiklikleri kuruma, otojen kuruma, kimyasal reaksiyonlar ve sıcaklık değişiklikleri sonucunda meydana gelir. Tipik olarak agrega fazı hacimsel olarak karardır, bunun bir sonucu olarak çimento hamuru büzüşen bir bileşen olarak düşünülebilir [74].

Büzülme kavramı zaman ile ilişkilendirebilir. Üzerine uygulanan yükten bağımsız olarak beton yaşı ilerledikçe beton hacminde küçülmeler görülecektir. Üzerine sabit yük uygulanan betonların zamanla hacim değişikliğine uğramaları ve sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan hacim değişiklikleri rötire olarak tarif edilmemektedir [75]. Rötreyi başka bir şekilde tarif edecek olursak, betonun zamana bağlı olarak, yüklenmemiş ve sınırlandırılmamış numunenin sabit bir sıcaklıktaki deformasyonun ölçüsü olarak da ifade edebiliriz.

ACI 209.1R-05'e göre yapılan tanımda ise rötrenin, kuruma olayı sırasında gerçekleşen kapiler kuvvetler sonucu oluştuğu belirtilmiştir. Rötire ifade edilirken şekil değiştirmeler, mikrostrain (1×10^{-6} mm/mm) olarak birimsiz uzunluk değişimleriyle gösterilir. Rötire ölçümlerinde yükten bağımsız olarak numunenin bir doğrultuda ki boyunun, ilk boyuna göre değişimi lineer olarak hesaplanır. Asıl olarak son uzunluk değişimi toplam uzunluk değişimi olacağından, toplam şekil değişimi Şekil 2.18'de görüldüğü gibi dış yüklemeler ve rötire kaynaklı şekil değişiminin toplamı olarak ifade edilir [76].



Şekil 2.18. Toplam şekil değiştirme [77].

Taze halde ki betonda su kaybı yalnız fiziksel iken, sertleşmiş durumda ki beton da fiziksel ve kimyasal etkileşimlerin bir arada gerçekleşmesiyle meydana gelmektedir. Örneğin beton döküldükten sonra taze halde bulunan betonun terlemesi sonucu beton yüzeyine ilerleyen suyun, buharlaşma sonucu beton bünyesinden uzaklaşması fiziksel bir durumdan kaynaklanan rötreyi gösterirken, hidrasyon olayı, kuruma olayı, betonun karbonatlaşması gibi etkenlerden kaynaklanan hacim küçülmeleri kimyasal nedenlerden dolayı gerçekleşmektedir.

Rötreyi etkileyen en önemli faktörlerden biri de kuruma anındaki ortam koşullarıdır. Diğer bir deyişle beton numunesinin saklandığı ortamın bağıl nemidir. Eğer beton bağıl nem oranı % 100 olan bir yerde saklanırsa büzülme oluşmaz aksine şişme oluşur. Kuruma ne kadar bitmeyen bir olgu ise şişmede bitmeyen bir işlemdir. Beton numunesi kuruma koşullarına bırakılıp daha sonra ıslatılmaya başlanırsa şişmeye başlar. Numuneler suda saklansa bile ilk kuruma rötresi düzeltilemez ve kuruma rötresinin tam olarak geri döndürülememektedir.

Betonda ki hacim değişiklikleri yalnızca betondan uzaklaşan su ile ilgili olmayıp, beton bünyesine giren suda betonda genleşme meydana getirerek hacim değişikliğine sebep olur. Fakat betonun genleşmesi, büzülmesi kadar önemli bir etki göstermez. Büzülme sırasında oluşan gerilme farkları betonda çatlamaya neden olurken, genleşme kaynaklı böyle bir problemle karşılaşılmaz [11].

Eğer beton herhangi bir sınırlandırılmaya maruz bırakılmazsa uzunluğu/alanı/hacmi değişikliğe uğrar, serbest rötire olarak adlandırılan bu durum betonun içsel bir özelliği olup genellikle diğer mühendislik malzemelerinde pek rastlanmaz. Rötire sınırlandırıldığı takdirde ise, betonda istenmeyen çatlamalara neden olarak, beton yapıların hizmet özelliğini etkileyen ve kısıtlayan kritik bir parametredir.

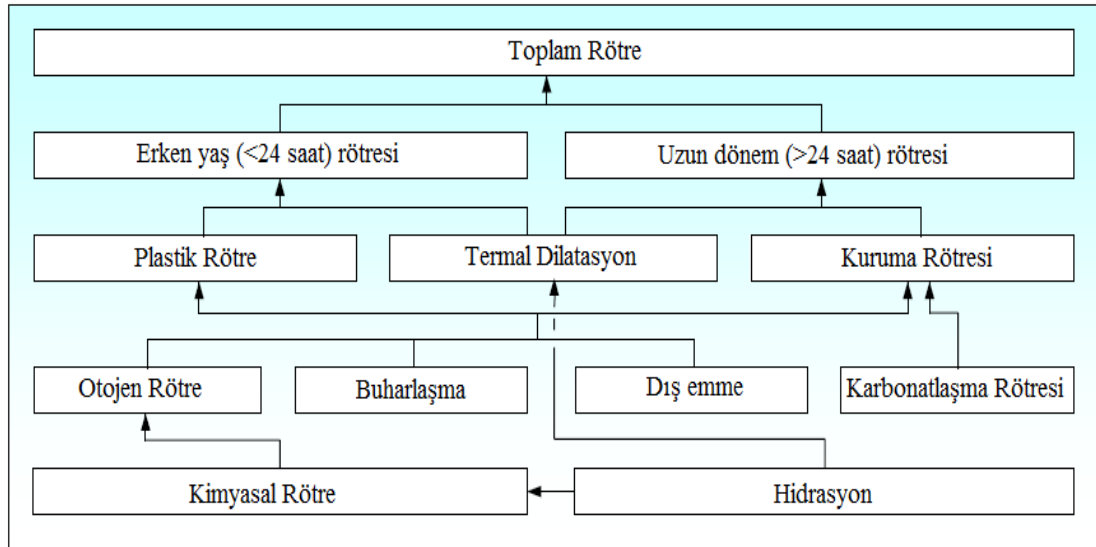
Kendiliğinden Yerleşen Betonun reolojisini elde etmek için, daha büyük miktarda çimentoya ihtiyaç duyulmaktadır. Daha yaygın olarak, daha büyük macun hacimleri ve daha düşük agrega hacmi olan betonların daha büyük büzülme sergilediği bilinmektedir. Bu nedenle, KYB'nin, geleneksel betonlardan daha fazla büzülmesi olduğu varsayılmaktadır. Betonda rötrenin önemi, betonda önemli bir büzülme olması durumunda betonda belirgin bir çatlamanın olacağı gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı, rötreyi kontrol altına alma KYB için büyük önem taşır [78].

Modern yüksek dayanımlı betonların macun içeriği yüksek ve genellikle düşük su s/ç oranlarına sahiptir. Yüksek dayanıma sahip betonların performansının da arttığı yaygın olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte yapılan araştırmalar yüksek dayanımlı betonlarda kırılmaya karşı artan bir duyarlılık göstermektedir. Bu

duyarlılık erken yaşlarda otojen rötre ve gevreklik, azalan bir gevşeme ve sünme artışları ile açıklanmaktadır [74]. Ayrıca rötrenin hamur içeriğine bağlı olduğu da düşünülürse, çimento içeriği artırılarak oluşturulan yüksek mukavemetli beton daha yüksek toplam büzülme ile karşı karşıya kalmaktadırlar. KYB’lerde yüksek dayanımlı bir özel beton sınıfı olmakla birlikte, içerdikleri yüksek hamur hacminden dolayı geleneksel betonlara göre daha fazla rötreye maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle KYB’lerde dökümden hemen sonra ki yaşlar da betonun kürlenmesine dikkat edilmelidir. Yapılan çalışmalarda KYB’nin geleneksel betona göre plastik büzülmesi 4 kat daha fazla görülürken, kuruma rötrelерinde hemen hemen aynı olduğu gözlenmiştir.

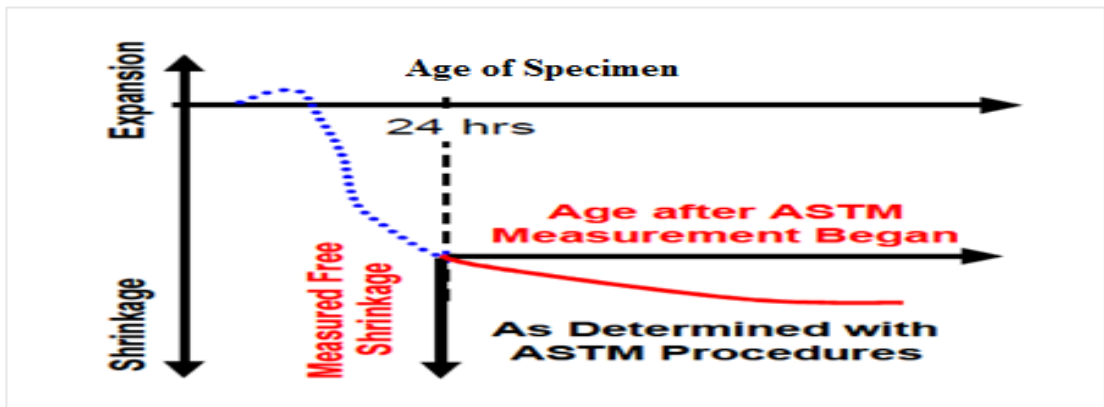
Rötre de başka bir kavram da erken rötredir. Erken yaş büzülmesi için iki temel itici güç vardır: Taze betondan su kaybı nedeniyle buharlaşma büzülmesi (veya erken yaş kurutma büzülmesi) ve hidrasyon ve kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan otojen büzülme. Beton birkaç saat boyunca yarı-akışkan özelliğini korur. Beton ömrünün ilk 3-4 saatinde hidrasyon çok yavaştır fakat sonraki 8-12 saatte hızlanır. Bu esnada beton yarı-akışkan durumdan daha sert duruma geçer ve çatlamaya yatkındır. Yeni katılaşmış betonda çimento ve agrega parçaları arasındaki boşluktaki su, karışıma pozitif boşluk suyu basıncı uygular. Beton yüzeyi kurudukça bu durum değişir ve beton doymuş durumdan, kısmi doymuş duruma geçer. Bu boşluk suyunda kapiler çekme uygular ve bu katı parçaları birbirine yaklaştıran kapiler emmeye neden olur. Beton sınırlandırıldığında rötre, dış katmanlarda gerilmelere neden olur. Gerilme betonun çekme kapasitesini aştığında daha fazla iç sınır oluşturur ve bu durum yüzeyde veya yüzeye yakın çekme gerilmelerine neden olur. Genel olarak iç sınır erken rötreye neden olur [79,80].

Yapısal kısıtlama dahil genişleme mekanizmalarını dikkate almadan, erken yaş ile uzun dönem arasında ayrım yapan toplam büzülmenin yönetim mekanizmaları Şekil 2.19’da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Toplam büzülmenin yönetim mekanizmaları [80].

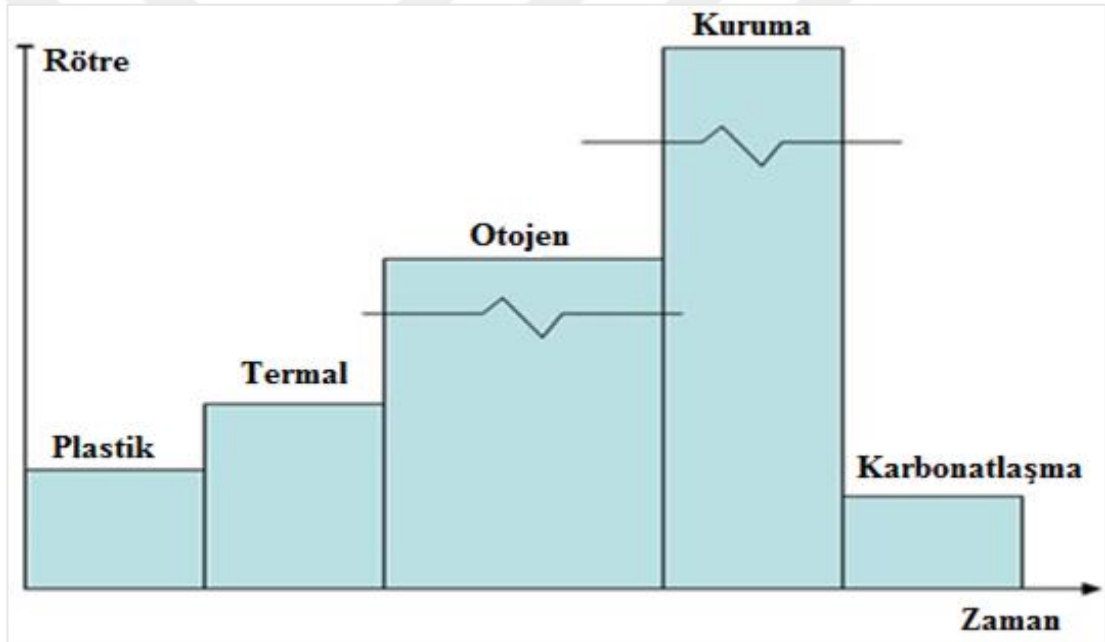
Çimento esaslı malzemelerin gerçek büzülme davranışını doğru bir şekilde tasvir edebilmek için, büzülmeyi ölçmek için standart tekniğe (ASTM C 157'ye) göre, serbest büzülme ölçümleri 24 saat sonra başlar. Serbest rötrenin 24 saat sonra ölçümünün etkisi Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Büzülmeyi ölçmek için kullanılan standart yöntemin gerçek büzülme davranışını yakalamadığı görülmektedir. Rötire ölçümünde, özellikle çimento macununun sertleştirilmesinden önceki 24 saatte problemler mevcuttur. Bununla birlikte, erken yaşlarda çimento macununun ve betonun büzülmesini ölçmek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Erken yaştaki büzülme, hacimsel ve boy değişim teknikleri ile ölçülmüştür [74].



Şekil 2.20 ASTM C157'ye göre serbest rötrenin ölçümü [74].

Rötre hızı zamana bağlı olarak değişir. 20 yıllık rötrenin %14-34 arası 2 haftada, %40-%80 oranı ilk 3 ayda, %66 - %85 oranı da 1 yılda gerçekleşmektedir. Bu sürelerden sonra rötre hızı giderek zamana bağlı olarak azalır [79].

Rötre, betonun zamana bağlı olarak yüklenmemiş ve sınırlandırılmamış numunenin sabit bir sıcaklıktaki deformasyonun ölçüsüdür. Rötre türleri temel olarak 4 sınıfa ayrılır: plastik, otojen, kuruma ve karbonatlaşma rötresi. Bunlardan ayrı olarak negatif rötre, termal rötre, kimyasal rötre gibi rötre türleri de diğer rötre türleri kadar ana başlık altında değerlendirmese de literatürde geçen rötre türleridir. Şekil 2.21’de farklı rötre türlerinin görece büyüklükleri gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Farklı büzülme türlerinin görece büyüklükleri [81].

2.9.1. Plastik Rötre

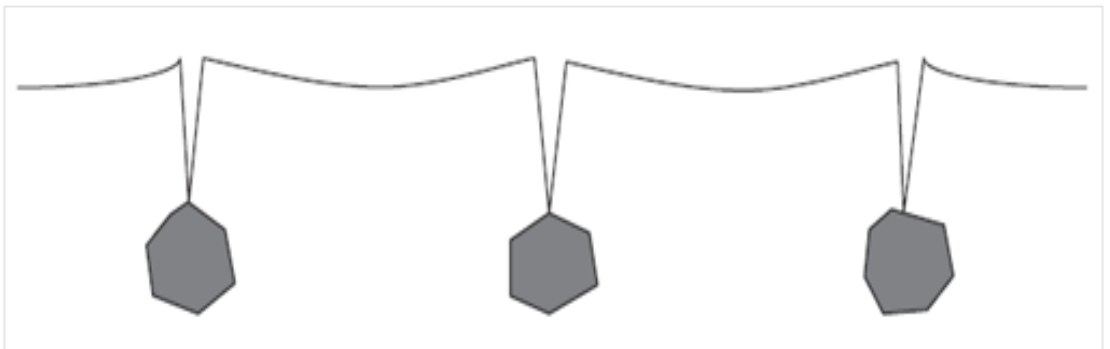
Plastik rötre, betonun henüz sertleşmeye başlamadığı, taze halde ki halinden priz başlangıcına kadar süre içerisinde görülür. Beton yüzeyinde biriken suyun ani buharlaşması ile görülen hacim değişikliğidir. Terleme ile beton yüzeyinde oluşan su miktarı, buharlaşma ile kaybedilen su miktarından az ise gerilme dengesizlikleri

ortaya çıkar. Beton dış yüzeyi büzölmeye çalışırken, iç yüzeyinde büzölme gerilmeleri görölmez ve çekme gerilmeleri oluşur. Bu çekme gerilmeleri beton yüzeyinde, iç kısımlara kadar uzanmayan ve derin olmayan çatlaklar oluşturur. Dökümden hemen sonraki birkaç saat içerisinde meydana gelirler [82].

Plastiklik kavramı betonun henüz prizini tamamlamış halde iken büzölme meydana gelmesinden dolayı kullanılmaktadır. Plastik rötre genel anlamda hava ve beton sıcaklığına, görelî nem miktarına ve rüzgar hızına bağılıdır.

Plastik rötre, genellikle yüzey tabakasındaki katı ve ağır maddelerin aşağıya doğru hareketine neden olur. Bu aşağı doğru hareket büyük boyutlu kaba agregâ veya üst katman takviyesi tarafından engellenebilir. Bu durumda kaba agregâ veya takviye çubuğunun üzerindeki beton yüzey katmanını agregâlar veya çubuklar üzerine dökölme eğilimi gösterir ve dolayısıyla Şekil 2.22’de gösterildiğı gibi plastik çekme çatlakları olarak adlandırılan çatlaklara neden olur [83]. Plastik rötre çatlaklar genellikle sığ derinliktedir, genellikle 38 ilâ 50 mm ve 300 ilâ 450 mm uzunluğunda, normalde dikeydir. Çatlakların beton dayanımına etkisi az olmakla birlikte estetik açıdan rahatsız edicidir. Zamanla dış etkenlerin agresif etkisiyle bu çatlaklardan beton durabilitesi de olumsuz etkilenir [84].

Plastik rötre çatlaklarının beton yüzeyindeki suyun buharlaşma hızı ile de ilintili olduğı, buharlaşma hızının $0,5 \text{ kg/m}^2/\text{sa}$ aştığı durumlarda bu çatlakların meydana geldiğı görölmektedir [85].



Şekil 2.22. Plastik rötre çatlaklarının formasyonu [83].

Yüksek s/ç oranı, kötü dizayn edilmiş beton, kuruma hızının fazla olması, fazla sızma, beklenmeyen titreşim plastik rötrenin artmasına neden olur. Plastik küçülmeyi önlemenin en etkili yolu, yapım sırasında yüzeyin rüzgar ve güneş ışığından korunması ve bitimden hemen sonra buharlaşma oranının düşürülmesine yönelik olarak yönlendirilen beton yüzeylerin kaplanmasıdır. Mastarlama işleminden sonra yüzeyi polietilen malzeme ile su kaybını aza indirmek, gece çalışmak, kontrollü bir şekilde yeniden vibrasyon, genleşen çimento kullanmak ve rötreye düzenleyici katkı maddesi kullanarak plastik rötreye azaltılabilir.

2.9.2. Otojen rötreye

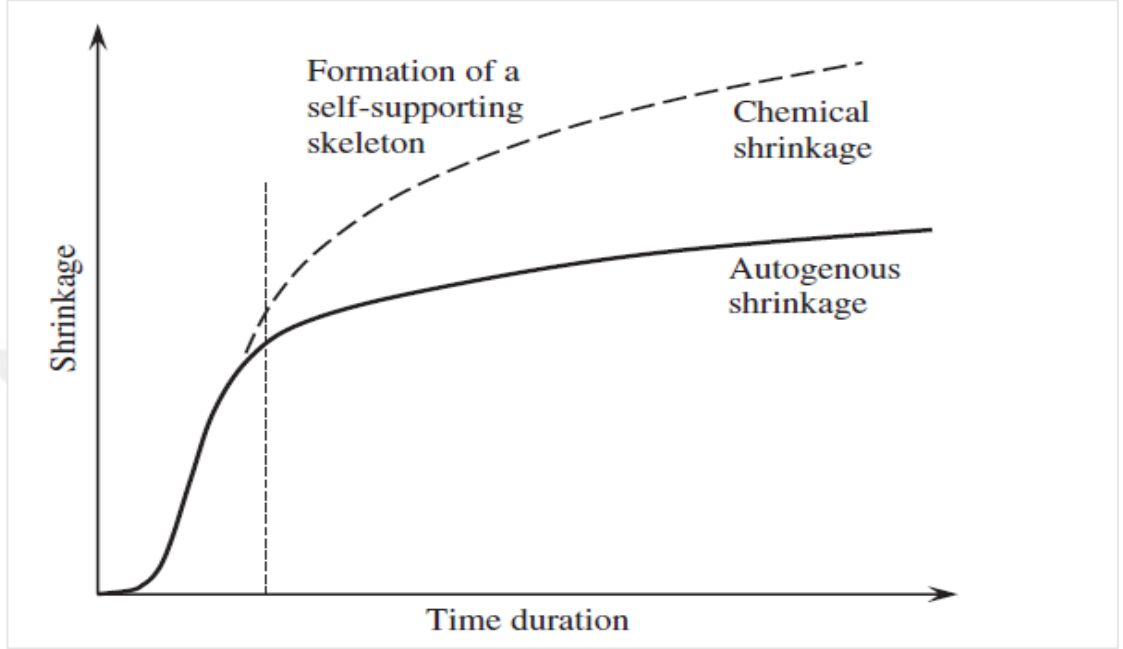
Otojen büzülme 1930'lar da (Lynam,1934) tanımlanmıştır. Yakın zamana kadar yüksek s/ç oranlı betonlar üretildiğinden bu kavram yeteri kadar dikkate alınmasa da son zamanlar da s/ç oranı düşük modern betonların üretimi ve su azaltıcı katkıların geliştirilmesiyle daha önemli hale gelmiştir [74].

Otojen rötreye daha çok s/ç oranı 0,40'dan düşük betonlarda görülür. Otojen rötreye hidratasyon reaksiyonu ile ilişkilendirildiğinden önlenmesi ve azaltılması oldukça güçtür. Diğer rötreye türlerine kıyasla büzülme miktarı çok az oluşmaktadır [11,84].

Otojen rötreye kavramı kimi kaynaklarda iç kuruma ve kimyasal rötrenin toplamı olarak ifade edilirken, kimi araştırmacılar otojen rötreyi, kimyasal rötreden farklı bir sınıfta incelemektedir. Bu rötreye sonucunda hacim küçülürken, ağırlıkta bir değişiklik meydana gelmemektedir. Otojen rötreye değişiklikleri çimento prizinin başlangıcıyla birlikte saptanmaya başlanır. Kuruma rötresi ile benzerlikler gösterse de, kuruma rötresinde beton içerisinde ki suyun bünyeden uzaklaştırılması ile tanımlanırken, otojen rötreye suyun içeride tüketilmesi ile oluşmaktadır [8].

Otojen büzülme ve kimyasal büzülmenin bazı farklılıklara sahip olduğuna dikkat edilmelidir. Otojen büzülme ve kimyasal büzülme arasındaki ilişki Şekil 2.23'te şematik olarak gösterilmektedir. Çimento macunu plastik bir aşamadaysa, görünür hacim değişimi veya otojen büzülme, mutlak hacim veya kimyasal büzülme azalması

ile esasen aynıdır. Hidrasyon ürünleri yapısal bir iskelet oluşturmak üzere sızdırıldığında, otojen küçülme iskelet tarafından engellenebilir ve teorik kimyasal rötreten sapabilir [83].



Şekil 2.23. Otojen büzülme ve kimyasal büzülme arasındaki ilişki [83].

2.9.3. Kuruma Rötresi

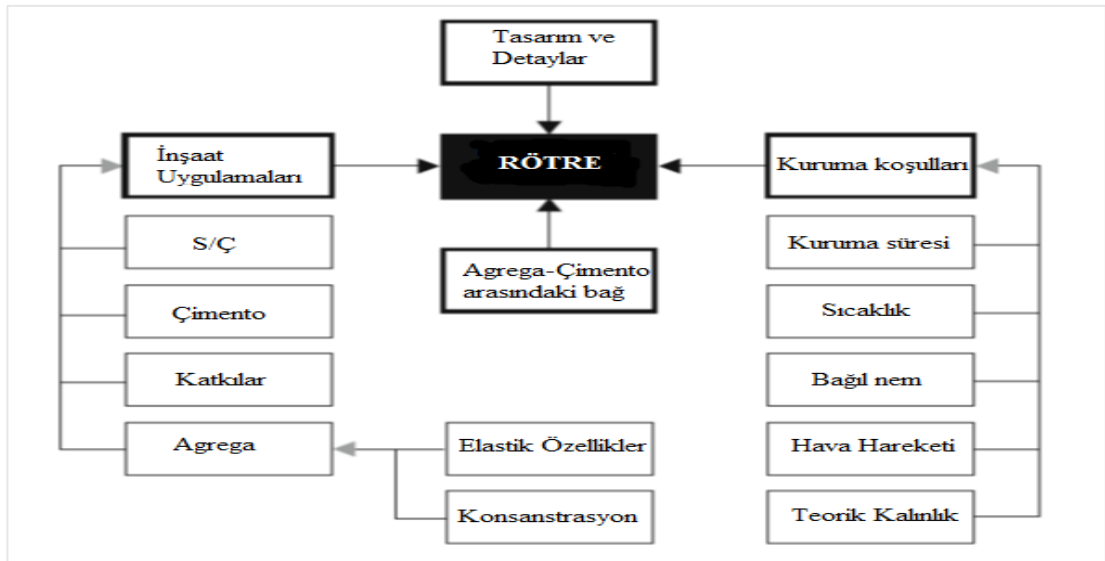
Kuruma rötresi nem hareketi ve suyun buharlaşması gibi mekanizmaları içeren bir rötre türüdür. Geleneksel normal dayanımlı betonlarda rötre tarif edilirken kuruma rötresi baz alınır, diğer rötre türlerinin ihmal edildiği söylenebilir. Kuruma rötresinde en büyük değerler numunenin yüzeye yakın yerlerinde rastlanırken, iç kısımlara doğru ilerledikçe bu değerlerin azaldığı görülür. Beton numunesinin boyutları, şekilleri ve aynı zamanda betonun hacim/yüzey alanı kuruma rötresini etkileyen faktörlerdendir. Kuruma rötresi, numune boyutları ve formülde gösterildiği gibi hacim/yüzey alanı ile ters orantılı olarak ilişkilendirilir. Numune boyutu küçük elemanlarda rötre hızı fazla olmakta, hacim/yüzey alanı arttıkça büzülme miktarı azalmaktadır [76].

$$R\ddot{ötre} \propto \frac{1}{\left(\frac{V}{S}\right)^2}$$

Kuruma b z lmesi, sertleşmiş betonda nem hareketinden dolayı betonun iç bağıl neminin düşüşünün bir sonucu olarak ortaya çıkar. Çimento hamurunun kuruma b z lmesi genellikle s/ç oranından etkilenir. Beton karışımının gözenekliliğı doğrudan s/ç oranı ile ilişkili olup, s/ç'yi artırmak gözenekliliğı artırır. Daha düşük s/ç oranı ile üretilen betonlar ise daha az gözenekli su ihtiva edecek ve bu da kuruma rötresinde bir azalmaya neden olacaktır [74].

Kuruma rötresinde ki hacim değışikliğı, herhangi bir dış yükleme olmadan da meydana gelir. Eğıer beton dış yüklere maruz bırakılırsa, hacim azalması daha da artacaktır [82].

Kuruma rötresi ayrıca betonun elastisite modülü, çekme gerilmeleri ve s nme gibi parametrelerden de etkilenir. Şekil 2.24'te kuruma rötresine etki eden parametreler zaman içerisinde değışken özellikler g stereceğıinden, kuruma rötresi sonucu oluşacak rötre çatlaklarının eğilimini tahmin etmek zor olup, bu konu için modelleme yöntemleri bulunmaktadır [84].



Şekil 2.24. Kuruma rötresine etki eden faktörler [86].

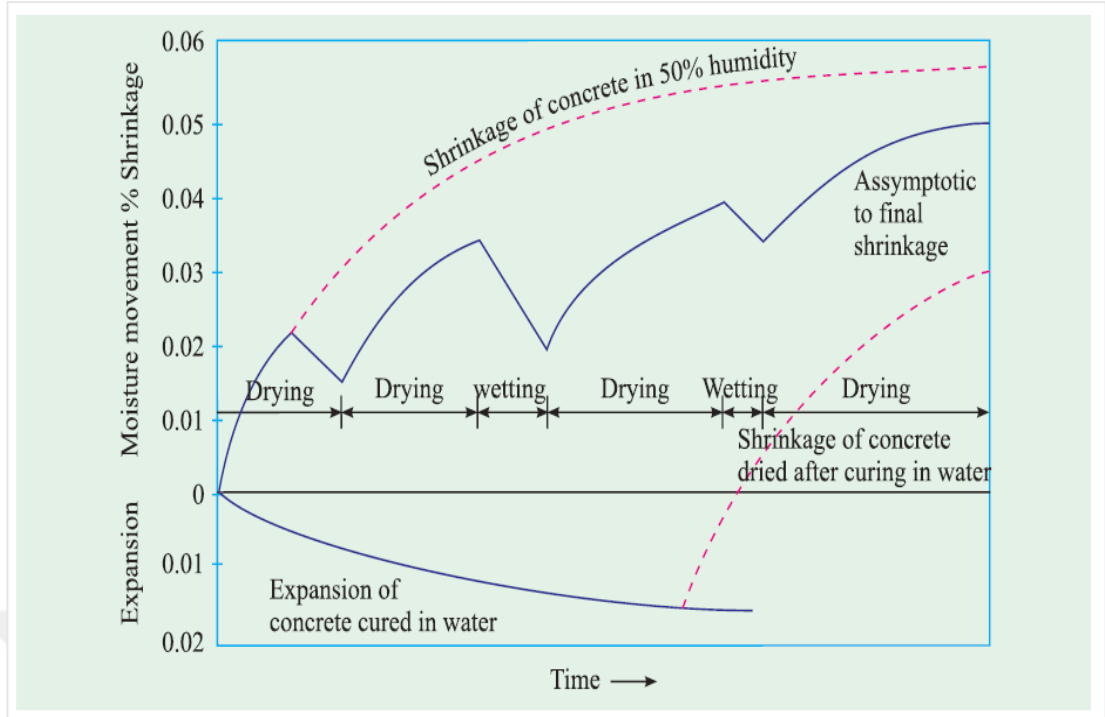
Kuruma rötresi çok uzun süre boyunca devam eder. Kuruma rötresinin büyük miktarı ilk ay içerisinde meydana gelir. Betondaki suların bünyeden uzaklaşması şu sıraları takip ederek gerçekleşmektedir.

- Çimento hamurunun kuruması
- Kılcal boşluklardaki suyun buharlaşması
- C-S-H parçacıklarının yüzeyinde ki emilen suyun kaybı
- C-S-H jelinin yapısına katılan suyun kaybı

Bu olayların sırayla gerçekleşmesi sonucu tanelerin birbirine yaklaşması sonucu büzülme meydana gelmektedir.

Çimento hidratasyonunun hiç bitmemesi gibi, kuruma koşullarına bağlı olarak kuruma rötresi de, hiç bitmeyen bir işlemdir. Beton kuruma koşullarında bırakıldığı sürece jel suyu uzun zamanda yavaşca kaybolur. Çimento hamuru harçtan, harç betondan daha fazla büzülür. Küçük taneli agregadan yapılmış beton iri taneliden daha fazla büzülür. Kuruma rötresinin büyüklüğü jelin inceliğine de bağlıdır. Jel ne kadar inceyse o kadar fazla büzülme olur [79].

Beton bünyesinden suyun uzaklaşması ile meydana gelen kuruma olayı ilk zamanlarda hızla bir artış göstermekte ve zamana bağlı olarak kuruma olayı devam ettikçe rötre miktarı da artmaktadır. Kuruma olayından sonra, tekrar ıslanma durumuna getirilen beton, boşluklarına giren su nedeniyle büzülmenin bir kısmı geri dönebilmektedir. Bu büzülmenin telafisi tamamen olmayıp, kalıcı büzülme olarak devam etmektedir. Bu geri dönüş oranı, toplam büzülmenin %40-%70'i arasında değişmektedir. Bu oran ortama, k r koşullarına ve betonun yaşına bağlıdır. şekil 2.25'te ıslanma-kuruma çevrimine maruz bırakılan numunenin büzülme mekanizması gösterilmiştir. [85].



Şekil 2.25. Islanma-kuruma çevrimleri ve rötre ilişkisi [87].

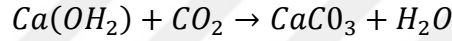
Mineral malzemelerle ilgili kuruma rötresi üzerinde çalışmalar yapılmış olup, silis dumanı ve cüruf gibi mineral malzemelerin kuruma rötresi üzerine etkileri incelendiğinde, erken dönem rötre ve uzun dönem rötrelerine etkilerinde farklılıklar görülmüştür. Bu gözlemlerde erken dönem kuruma rötrelerinde olumlu etkisi görülürken, uzun dönem de normal çimentolu betonlara kuruma rötresi değerlerinde bir artış gözlenmiştir [76].

2.9.4. Karbonatlaşma rötresi

Karbonatlaşma rötresi yeni tanımlanan bir olgudur. Atmosferdeki karbondioksit, sulu çimento ile etkileşime girer. Kalsiyum hidroksit, kalsiyum karbonata dönüşür ve bazı çimento bileşikleri parçalanır. Sulu çimentoda kalsiyum bileşiğinin parçalanması, karbondioksit düşük basınçta olsa bile kimyasal olarak mümkündür. Karbonatlaşma, betonun maruz kalmış yüzeyine çok yavaş işler. Karbondioksitin içine işlemesi betonun nem muhteviyatına ve ortamın bağıl nemine bağlıdır. Karbonatlaşma ile

beraber betonun ağırlığında artış ve rötre meydana gelir. Karbonatlaşma rötresine muhtemelen kalsiyum hidroksit kristallerinin çözülmesi ve kalsiyum karbonatın yerinin bozulması neden olur. Yeni ürün değiştirilen üründen hacimce daha az olduğu için rötre olur. Betonun karbonatlaşması daha fazla mukavemete ve daha az geçirimsiliğe neden olur çünkü karbonatlaşma sonucu ortaya çıkan su hidrasyon başlatır ve kalsiyum karbonat çimento hamurundaki boşlukları azaltır. Karbonatlaşma rötresinin büyüklüğü kuruma rötresine göre daha az olduğundan, bu rötrenin fazla önemi yoktur [79].

Çimento hamuru ile havada ki CO₂ ile kimyasal reaksiyon oluşturması sonucu meydana gelir. Tamamen geri dönüşsüz bir rötre türüdür.



Denklemden gösterildiği gibi kalsiyum hidroksitin CO₂ ile tepkimesi sonucu ortaya çıkan H₂O'nun buharlaşarak ortamdan uzaklaşmasıyla rötre meydana gelmektedir. Karbonatlaşma rötresi ortamın nem içeriğiyle doğrudan ilişkilidir.

Karbonatlaşma büzülmesi sonucu meydana gelen çatlakların yönleri bir kalıba uymayıp, örümcek ağı şeklinde rastgele uzanan çatlaklar olup, bu çatlakların derinlikleri fazla olmayıp, yüzeye yakın kısımlarda oluşmaktadır [85].

2.9.5. Negatif Rötre (Şişme)

Rötre kavramı genellikle hacim azalmasından kaynaklı bir hacim değişikliği olarak açıklanır. Uzun süre su içerisinde muhafaza edilen betonlar veya çimento hamurları, çimento jelleri tarafından absorbe edilen su nedeniyle hacim artışına uğrarlar. Bu su molekülleri C-S-H jellerinin arasına yerleşerek, bu jel moleküllerinin kohezyonuna karşı koyan bir kuvvet olarak hareket etmesi sonucu şişerek karşı bir basınç oluşturmaktadır. Bu hacim artışı şişme veya negatif rötre olarak adlandırılmaktadır [82].

Çimento hamurunun ve betonun devamlı olarak su içerisinde kalması nedeniyle oluşan şişme, lineer olarak, çimento hamuru için; 100 günlük süre sonunda 1300×10^{-6} , 300 kg/m³ çimento ile üretilmiş bir betonda ise, 6 aylık bir süre zarfında 100×10^{-6} mertebesinde oldukları görülmüştür. Bu hacim değişikliğinin yanında yaklaşık %1 oranında ağırlıklarında da bir artış olduğu saptanmıştır [85].

2.9.6. Rötreye Etki Eden Parametreler

Hacim değişikliği olarak ifade edilen rötre, genellikle kuruma ve kimyasal rötrenin toplamıdır, toplam ise zamanla azalan oranla artar. Zaman sonsuza ulaştığında rötre son değerini alır ve betonun kurumasına neden olan bütün faktörlere bağlıdır. Bu faktörler, karışım özellikleri (özellikle bağlayıcının türü ve miktarı, su muhteviyatı, su/çimento oranı, ince agreganın kaba agregaya oranı, agrega türü), sıcaklık ve bağıl nem, numunenin boyutu ve şeklidir.

Çimento; Betonda rötreyi etkileyen en önemli özelliklerden birisidir. Çimento dozajı ile rötre arasında doğrusal bir ilişki kurulabilir. Kendiliğinden yerleşen betonun reolojisini elde etmek için, daha büyük miktarda çimentoya ihtiyaç duyulmaktadır. Daha yaygın olarak, daha büyük macun hacimleri ve daha düşük agrega hacmi olan betonların daha büyük büzülme sergilediği bilinmektedir. Bu nedenle, KYB'nin geleneksel betonlardan daha fazla büzülmesi olduğu varsayılmaktadır.

Betonda kullanılan çimento hamurunun yoğunluğu arttıkça, çimento hamurunu oluşturan tanecikler arası mesafe, C-S-H jellerinin birbirlerine yaklaşması sonucu azalacak ve rötreye daha fazla karşı karşıya kalınacaktır.

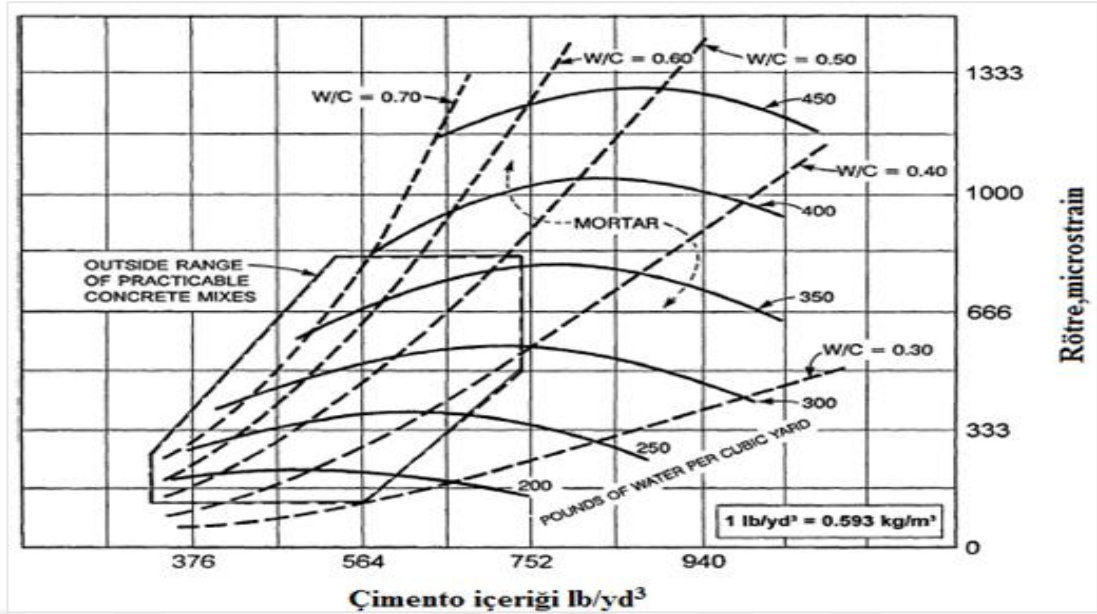
Çimentonun kimyasal yapısını oluşturan ana malzemeler C3S, C2S, C3A ve C4AF'nin de rötre üzerinde etkili olduğu söylenebilir. C3A'nın hidratasyon üzerinde ki etkisi rötre üzerinde olumsuz bir etki yaratır. Erken priz alması ve yanlış yerleşmesi, su içerisinde Ca ve SO₄ tuzları ile reaksiyona girmesi sonucu, yan ürünler oluşturmaları, betonu dayanıklılık açısından olumsuz etkiler. C3S'in fazla olması yine erken hidratasyon nedeniyle olumsuz bir özellikken, C2S'in

hidratasyonu yavaşlatması rötrenin azalmasında olumlu bir etki yaratır [11]. Çimentonun inceliğinin artması, karışım kompozisyonların da gerekli su ihtiyacını artıracakından, rötreyi artıran faktörlerdendir.

S/  oranı da rötreye etki eden önemli parametrelerden birisidir. Hacim değişikliği sonucu oluşacak birim boy değişiminin ana etkeni, beton bünyesinden uzaklaşan su miktarıdır. Su  imento hamurunda değişik şekillerde görülebilir. Bunlar; suyun  imento ile kimyasal reaksiyona girmesi ile kimyasal bağlarla tutunan kristal suyu, C-S-H jelleri tarafından absorbe edilen su, boşluklarda bulunan kapiler su olarak tarif edilir. Bu suların bulunma şekillerine göre beton bünyesinden uzaklaştırılmaları farklı olup, birim rötreye etkileri farklıdır [88].

Dizayn edilen betonda s/  oranı yüksek seçilmesiyle, toplam su içeriğinin arttırılması büzülmeyi artırma eğiliminde olacaktır. Beton içerisinde ki kapiler boşluklar artacak ve buharlaşmanın daha kolay olması nedeniyle büzülme miktarı artacaktır. Aynı zamanda dayanım daha düşük olacak, dayanımın düşük olması çatlakların oluşması gibi dayanıklılığı da etkileyecektir.

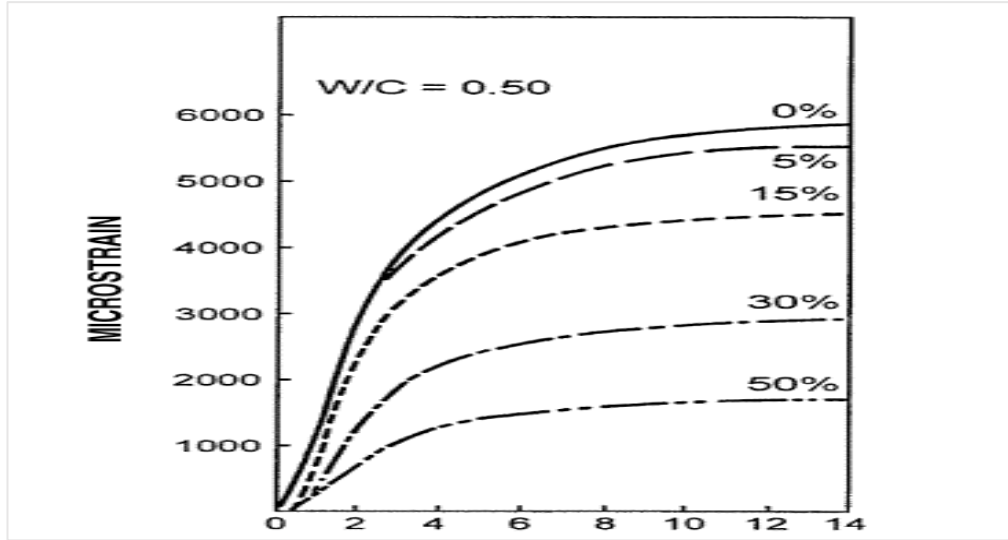
Su içeriği ve  imento içeriğinin birleşik etkileri şekil 2.26'da gösterilmektedir. Çimento içeriğini 335'den 450 kg / m³'e (564 ila 752 lb/yd³) arttırmak, 290'dan 560 mikrostraine bir büzülme artışı ile sonuçlanır; bu 0.40'lık bir s/  için yaklaşık % 90'lık bir artış olur [77].



Şekil 2.26. s/ç, çimento ve su içeriğinin uzun süreli büzülme üzerine etkisi [77].

Agrega'nın rötre yi etkileyen unsurlardan bir tanesi, agreganın cinsidir. Betonda kullanılan hafif agregaların, ağır agregalara göre daha fazla boşluk oranına sahip olduğundan rötre oranı daha yüksektir. Ancak bazı çalışmalarda ıslatılarak kullanılan hafif agregaların, normal ağır agregaya kullanılarak üretilen betonlardan daha az rötre yaptığı sonucuna da ulaşmışlardır. Agregta tanelerinin küçük olması ve düşük elastite modülüne sahip olması birim rötre üzerinde olumsuz etkiye sahiptirler [88].

Betonun potansiyel büzülmesini etkileyen en önemli faktörlerden biri, çimento macununun büzülmesini sınırladığı için, bir karışımdaki toplam agregta hacmidir. Agreganın beton karışım içerisindeki hacimsel oranların, büzülme üzerindeki etkisi şekil 2.27'de gösterilmekte olup, formül 1 de agregta hacmi üzerinden formülize edilen rötre hesabı verilmiştir. Karışım içerisinde kullanılan agregta hacminin artması, büzülmeyi asıl etkileyen parametre olan çimento hamur hacminin azalmasına neden olacağından rötre yi azaltacaktır.



Şekil 2.27. Agrega hacimsel içeriğinin beton kuruma büzülmesine etkisi [77].

$$S_c = S_p (1 - g)^n$$

S_c = betonun büzülmesi

S_p = macunun küçülmesi

g = agrega hacimsel fraksiyon

n = değişkendir.

Önerilen n değerleri 1,2 ve 1,7 arasındadır. Genel inşaatlarda kullanılan çoğu beton, 0,6 ila 0,8 arasında agrega volümetrik fraksiyonlara sahiptir [77].

Betonda **Mineral katkılar** kullanmak su ihtiyacını artıracığından, rötrenin bu artan su ihtiyacından olumsuz etkilenmesi beklenir. Fakat bazı çalışmaların sonuçları bunun aksinin olabileceğini, iyi kür koşullarında, mineral katkıların belirli oranlarda kullanımının rötreyi negatif yönde etkilemediğini savunmuşlardır. Farklı **kimyasal katkıların** da büzülmeye etkileri farklı olmaktadır. SRA ile herhangi bir kimyasal katkıyı kullanırken üretici firmanın hazırladığı kullanım kılavuzunu dikkate almak gerekmektedir.

Geçirimlilik, betonun sağlıklı yerleşmesiyle alakalı olup, sağlıklı bir şekilde yerleşemeyen betonlarda iyi sıkışmamadan dolayı boşluklar oluşacaktır. Mevcut suyun betondan uzaklaşma hızı geçirimsizlik ile doğru orantılı olup, rötreyi etkileyen unsurlardandır. KYB'nin iyi yerleşme ve sıkışmasından dolayı ve boşluk oranının daha olması nedeniyle geçirimsizlik açısından geleneksel betonlara göre daha az rötre ile karşı karşıya kalır [88].

Betonun toplam **hava** içeriği % 8'den az olduğunda, genellikle kuruma büzülmesinin büyüklüğü üzerinde herhangi bir etkisi yoktur [77].

Ortam koşulları da rötreyi direkt olarak etkileyen unsurlardandır. Sıcaklık, rüzgar koşulları, nem içeriği gibi etkenler beton içeriğinden bağımsız olarak rötreyi azaltıp ya da artırabilirler. Düşük nem, fazla rüzgar, yüksek sıcaklık gibi koşullar rötreyi artırır. Yüksek sıcaklıkların tek başına büzülme üzerindeki etkisi, bağıl nemin azaltılmasından daha az belirgindir.

1990 CEB FIP Modeli Kodu (1990), büzülme zaman hızını ve son büzülmeyi ayarlamak için denklemleri göstermektedir. Uzun süreli yüksek sıcaklıklara maruz kalan tipik bir yapısal beton için, 1990 CEB-FIP Model Kodu, sıcaklık artışından 23°C'den 60°C'ye kadar sabit nispi nem altında, yaklaşık % 6 oranında büzülme zaman hızında bir artış ve yaklaşık % 15 oranında bir nihai büzülme oranında bir artış öngörür [77].

2.9.7. Rötre Çatlakları

Eğer beton elemanları engelsiz büzülebiliyorlarsa, rötre mühendislerin ana problemi olmaktan çıkar. Fakat olay tam anlamıyla bu değildir. Betonun büzülmesi, destekleri veya komşu yapısı tarafından sınırlanır. Beton içerisinde bulunan donatı ve agrega gibi elemanlar da rötreyi kısıtlar. Her bir sınır, betonun çekme yükünü artırır ve bu zamana bağlı çatlağa neden olabilir, sehimini artırır ve var olan çatlakları genişletir. Rötreyi sınırlamak betonda ki belki de çatlamaya neden olan en genel sebeptir. Çoğu durumda bu problemler ortaya çıkar ve rötre tasarımcı tarafından hesaba katılmaz,

etkileri yönetmelikler de çatlama kontrolü için sehim hesapları modellenmemiştir. Rötire çatlamaşının görölmesi, rötrenin sınırlanmasına, elemanın uzayabilirliğine, betonun çekme dayanımına, yüke, sünme gibi birçok parametreye bağıdır [79].

Betonun dayanıklılığının bozulması genellikle agresif gazların ve / veya sıvıların, çevre yüzeyinden beton içerisine bağılanan gözenekler veya mikro çatlaklar vasıtasıyla, beton içerisine hareket etmesinden kaynaklanır. Yeni betonun sıkıştırılması sırasında çimento macununun ve agregaların göreceli hareketi nedeniyle, çimento macununun veya yakın yüzey betonun harcının derinliği, derin alana göre daha fazladır. Sonuç olarak, yakın yüzeyli beton daha fazla kırılma eğilimi gösterir. Bu arada, su buharlaşması genel olarak açıkta kalan beton yüzeyinden başlar, erken yaşlarda yakın beton yüzeyinde keskin bir nem eğimi vardır. Nihai nem dengesine ulaşılmadan önce, bir büzölme kısıtlaması oluşur. Büzölme gerilmeleri betonun gerilme mukavemetini aşarsa, o zaman çatlama veya mikro çatlamlar oluşur [89]. Betonda küçük çatlaklar bile betonda problemlere neden olacaktır. Çatlak, yıpranma, sıcaklık değışiklikleri ve çatlama sızan su nedeniyle büyümeye devam edecektir [78].

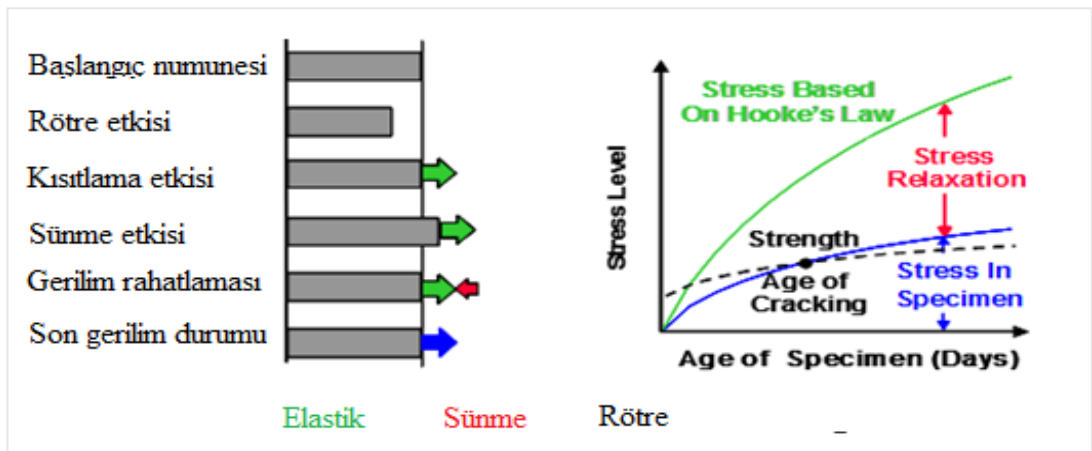
Betonda çatlama çalışması karmaşıktır. Çatlak genişliklerinin ve aralığının analizinde büyük farklılıklar gözlenebilir. Zeminde döşeme uygulamalarında, çatlak genişliklerinin tahmini büyük ölçüde değışir ve geniş dağılımlara tabidir. Bunun nedeni ise betonun kalitesine, çatlak gözlenen yerin geometrisine, nem farklılıklarına, sınırlanma olup olmamasına, agreganın cinsi ve kalitesine bağıdır.

Çatlaklar, sadece mukavemet ve dayanıklılıkta bozulma değıl aynı zamanda daha fazla bakım ihtiyacı nedeniyle ekonomik kayıplara da neden olur. Betonda ki çatlakların sebepleri büyük oranda yapısal faktörlere, materyal faktörlerine, miktar faktörlerine ve çevresel faktörlere bölünebilir. Sorunun önemli bir kısmı kuruma büzölmesi ile ele alınır ve kuruma büzölmesinden kaynaklanan çatlaklar, beton yapılarda kaçınılmaz olarak kabul edilir. Kuruma büzölmesi meydana geldiğinde, büzölme kuvvetinin dengesizliği nedeniyle Şekil 2.28'de görüldüğü gibi beton yapılarda çatlaklar oluşur [90].



Şekil 2.28. Köprü ayaklarında oluşan kuruma rötresi çatlakları [91].

Rötreye bağlı çatlak oluşum mekanizmalarına genel bir bakış Şekil 2.29'da gösterilmiştir. Başlangıç numunesi büzülme nedeniyle uzunluğu azaldığında, gerilme seviyesi artmaktadır. Gerilme mukavemeti, Hooke Yasası kullanılarak hesaplanan teorik gerilme aşılnca, çatlama beklenir; bununla birlikte, yükler sürüldüğünde oluşan zamana bağlı bir deformasyon olan sünme, Hooke yasası tarafından öngörülen gerilimin altında bir gerilmenin oluşmasına neden olur. Sünme etkileri, çatlamanın yaş artışı ve gerilme gevşemesine neden olur. [74].



Şekil 2.29. Gerilim gelişimine genel bir bakış [74].

Betonda rötre çatlaklarını azaltmak için çeşitli teknikler önerilmiştir. Bu yöntemlerin bazıları iyi betonlama uygulaması olarak adlandırılabilir. Bu yöntemler, su içeriğini azaltmak, agrega sertliğini ve içeriğini arttırmak için karışım tasarımının optimizasyonunu içerir. Buna ek olarak, buharlaşmayı azaltmak ve iyileştirilmiş kür uygulamaları da bu yöntemler arasında kullanılmaktadır. SRA gibi kimyasal katkı maddeler de rötre çatlaklarının boyutunu azaltmada, çatlak gelişimini kontrol etmede önemli yararlar sağlamaktadır [74].

2.9.8. Kısıtlanmış Rötre Deneyi

Uzun yıllar, beton karışımlarının kısıtlı büzülme davranışını test etmek için standart bir test prosedürü mevcut değildi. 90'lı yılların başlarından itibaren, çapraz köprü güverte kırma nedenlerini belirlemek ve tespit etmek için kapsamlı araştırma projeleri üstlenilmiştir. En önemli faktörlerden biri, büzülme koşulları altında betonun büzülmesi ve çatlama olarak tanımlandı. Farklı beton karışımlarının çatlama eğilimini, sınırlandırılmış koşullar altında en düşük çatlama ihtimali olan beton tasarımını seçmek için değerlendirmeye ihtiyaç duyuldu 1998'de AASHTO, halka testi "AASHTO PP34- 98: Betonun Çatlama Eğilimi Tahmini için Standart Uygulama" olarak geçici bir standart olarak önerdi. 2006'da AASHTO, bu testi tam bir standart haline getirdi. 2004 yılında (ASTM) tarafından, "C 1581 - 04 geliştirildi [92]. Bu test yöntemi, farklı çimentolu karışımların erken yaş çatlama olasılığını belirlemek ve büzülme altında çatlama olasılığı düşük olan çimento esaslı malzemelerin seçimine yardımcı olmak için faydalıdır.

Düşük kırılma direncine bağlı olarak, erken çatlama genelde betonda görülür, özellikle düz beton elemanlarında ve endüstriyel zeminlerde, beton kaldırımlarda, büyük kuruma yüzeyi olan (alanın hacme oranı) kaplamalarda görülür. Rötreye bağlı olan betonun hacim değişimi önleildiğinde, artık gerilmeler oluşur çatlama da, çekme gerilmesi beton çekme mukavemetini aştığında oluşur. ASTM C341, betonun serbest rötresini bulmak için 400 mm uzunluğunda ve 100 mm genişliğinde bütün yüzeyleri kurumaya maruz kalan kare prizmayı kabul eder. Bunu prizmalardaki boyuna uzunluk değişimini gözlemleyerek elde eder. İyi bilindiği üzere betonun kuruma

rötresi büyük oranda A/V (Alan/Hacim) oranına bağlıdır. ASTM C341'deki prizma numuneler vasıtasıyla serbest rötre sonuçlarını kullanmak için beton elemanlarının aynı A/V oranına sahip olması gerekir. Gerçekte bu oranı yakalamak her zaman mümkün değildir. Serbest rötre verisi farklı karışım oranlarını karşılaştırmada yararlı olsa da betonun pratikte ne zaman  atlayacağı hakkında yeterli bilgi vermez. Sınırlı koşullardaki betonun çatlama eğilimi nitel gözlemlerle değerlendirilir. Nitel gözlemler halka, çubuk, plaka/levha gibi çatlama deneyleridir. Dairesel halka deneyi basitliği ve esnekliği nedeniyle asırlardır en fazla kullanılan deneydir. Betonun  atlama potansiyelini değerlendirmek için bir deney metodu olarak, fazla sayıda malzemenin tespiti için kısa zamanda çatlak oluşturma yeteneği tercih edilir. Halka deneyinde betonun sınırlanma derecesi büyük oranda  elik halkaya bağlıdır. Kalın  elik halka daha fazla derecede sınır uygular böylece daha fazla çekme gerilmesi oluşturur. Dairesel halkadaki beton eğer sınırlayan  elik yeterince kalın değilse (sertlik büyük değilse) görülür bir çatlak oluşturmaz. Geometri etkisine bağlı olarak beton, sınırlanmış rötreye maruz kaldığında dairesele halkanın çevresinde eşit olasılık ile ilk çatlağını oluşturabilir [93].

Dairesel halka testinin avantajının yanında dezavantajları da vardır. Öncelikle, halkanın çevresinde çatlamaya eşit fırsat verdiği için başlangıçtaki  atlamamanın yerini tahmin etmek zordur. İkincisi, yeterli sağlamlığa sahip olmayan bir  elik halka için, daha yüksek tokluğa sahip beton, görünür bir çatlak oluşturamaz; ancak daha görünmez ince çatlaklar, betonun dayanıklılığı ile ilgili olumsuzluklara neden olabilir. Bir maddenin çatlama hassasiyetinin değerlendirilmesi, beton dayanımı değerlendirmesinde gereklidir. Harç veya betonun çatlak yayılma oranını arttırmak ve malzemelerin kırılma duyarlılığını daha kısa s relerde ayırmak amacıyla kısıtlamalı büzülme testi için yeni bir elips tipi halka geliştirilmiştir. Bu kurulumda, uzun ana eksen doğrultusunda çekme dif zif gerilme gelişimi, kısa ana ekseninkinden daha hızlıdır, uygun geometriye sahip elips halkalarda daha fazla gerilme yoğunluğundan dolayı daha önce çatlamaya müsait olurlar ve böylece betonun çatlama potansiyelini belirleyen halka deneyini hızlandırır [83,93].

2.9.9. Rötre Azaltıcı Katkı Maddeleri (SRA)

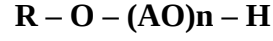
Betonda rötreyi azaltmak için çeşitli teknikler   nerilmi tir. Bu yöntemlerin bazıları 'iyi betonlama uygulaması' olarak adlandırılabilir. Bu yöntemler, su içeriğini azaltmak veya agrega sertliğini ve içeriğini arttırmak için karışım tasarımı ının optimizasyonunu, buharla mayı azaltmak veya iyile tirilmi  k r uygulamaları olarak sayılabilir. Ayrıca büzülme derzleri de rötre azaltmak için bir yöntem olarak kullanılmaktadır [74].

Genle en  imento kullanmak rötreyi azaltmada bir başka yöntemdir. Genelde genle en  imento, genle meyi etrenjit (kristalle en hidro kalsiyum alüminyum sülfat minerali) oluşturarak yapar. Bu oluşum sadece belli bir s renin sonunda oluşur ve erken çatlamayı kontrol etmede etkili değildir. Ayrıca büzülme telafi edici  imento kullanıldığında, erken hidratasyon aşamalarında oluşan etrenjitin artması nedeniyle hızlı çökme kaybı sık görülür, problemli olabilir ve beton uygulama için kabul edilemez hale gelir [7,94].

Son 20 yıldıki katkı teknolojisindeki ilerlemeler, büzülme performansını arttırmak için SRA'ların (Shrinkage Reducing Admixture) daha fazla kullanılmasına neden olmuş ve SRA'lar kuruma rötresini azaltma amacıyla araştırma laboratuvarlarından, sahadaki uygulamalara doğru geçiş yapmıştır. SRA'larla elde edilen kuruma b z lmesindeki azalmalar, en uygun malzeme özellikleri, inşaat prosedürleri, çevresel koşullar ve tasarım hususlarıyla elde edilebilenlerden daha fazladır. Karışım suyu içerisinde sıvı halde da ılmı  halde veya malzeme içinde da ılmı  katı formlarda bulunur. Büzülme performansını artıran i  mekanizma, sıvı ve katı formlarda bulunan SRA'lar için oldukça farklıdır. Yapılan çalışmalarda sıvı SRA'lar daha sıklıkla kullanılır [95].

Rötre azaltıcı etken madde terimini açıkça kullanan ilk yayınlar 1983 yılları civarında Japonya'da ve ABD'de ortaya çıkmıştır. %50'ye varan kuruma rötre azalı ı, rötre modelindeki kapiler kuvvetten veya yüzey gerilmesinin azalmasından kaynaklanır. 1985 yılında Amerika patenti bu gruptaki yazarlara verilmiştir. (Temsilci:Nihon  imento  irketi Ltd.). Yüzey aktif bileşeni olarak 1 numaralı

formülde verilen alkil eter oksialkilen glikolü kullanmışlardır. Genel olarak bu kısa molekül çözülebilir olarak tasarlanmıştır. SRA araştırmalarının ilk üretimi, SRA'nın kapiler çekme gerilmesini azaltarak çalıştığını öne sürdü [96,97].



1

R: a) C₁₋₇ alkyl alcohol radicals incl. the n- or iso- formations) or

b) C₅₋₆ cyclo-alkyl radicals

A: C₂₋₃ alkylene radicals

n : integer, $1 \leq n \leq 10$ [1].

Japonya'da ortaya çıkan SRA, sıvıların yüzey gerilimini azaltan bir sürfaktandır. Yüzey aktif maddeler, içerildikleri sistemlerin yüzeylerini veya ara yüzeylerini değiştiren çeşitli kimyasal maddeleri teşkil eder. Sürfaktan molekülleri geleneksel olarak, "hidrofobik kuyruk" olarak adlandırılan, kutupsuz bir hidrokarbon zinciri ve "hidrofilik kafa" olarak adlandırılan bir polar işlevsel grubu içerir. Amfifilik özelliklerinden dolayı yüzey aktif maddeler sırasıyla sıvı / sıvı, sıvı / katı ara yüzeyler veya sıvı / gaz yüzeylerine adsorbe olmada güçlü bir yakınlık sergiler. Sürfaktan molekülünün basit bir şeması Şekil 2.30'da verilmiştir [96].



Şekil 2.30. Sürfaktan molekülünün şematik taslağı [96].

Literatürdeki çalışmalar açıkça SRA eklenmesine bağlı olarak, betonun rötre deformasyonlarının azaldığını gösterir. Ayrıca sonuçlar göstermiştir ki kuruma rötresinin azalmasına ek olarak SRA'lar, sertleşmiş hamurun kuruma koşullarındaki sınırlanmış betonun, çatlak genişliklerini azaltır. Bilinen diğer faydaları taze betonun akışkanlığını arttırmak ve çekme sünmesini azaltmaktır. Bununla beraber SRA'ların basınç ve çekme dayanımında azalış, elastisite modülünde azalış gibi negatif etkileri de vardır [98]. Betonun çeşitli mekanik özelliklerine SRA etkisi ile ilgili literatürde kayda değer değişkenlik bulunmaktadır. Elastisite modülü, basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımı üzerine rapor edilen tutarsız veriler muhtemelen kür koşullarına bağlı olan sonuçlara atfedilebilir [99].

SRA'ların kimyasal bileşimleri üreticilere göre farklılık göstermesine rağmen genellikle boşluk çözeltisinin yüzey gerilmesini, tavsiye edilen oranlarda eklenince %50 oranında veya daha fazla azaltır. SRA'ların boşluk çözeltisinin yüzey gerilmesini ve viskozitesini etkilemesine rağmen bu malzemelerin dozları, beton karışımındaki çimentonun kütlesine göre ayarlanır. SRA'lar genellikle polyoxyalkylene alkyl ether veya aliphatic propylene glycol ether bazlıdır. SRA'lar kuruma ve gerilmelere bağlı olarak oluşan uzamaları azaltmak için bir metot sağlar [96].

Kuruma büzülmesinin büyük kısmı, gözenek solüsyonunun yüzey gerilimi nedeniyle çimento macunu gözeneklerinde gelişen kılcal gerilmelerden kaynaklanmaktadır. Sıvı SRA'lar, gözenek çözeltisinin yüzey gerilimini azaltarak, kılcal gerilmeleri en aza indirgeyerek ve büzülmeyi azaltarak işlev görür. Beton sertleştikten sonra karışım gözenek sisteminde kalır ve yüzey gerilimini düşürmeye devam eder. Katkının temel amacı kuruma büzülmesini azaltmaktır, ancak taze ve sertleştirilmiş beton özelliklerini de etkilemektedir [95].

SRA eşik yoğunluğuna kadar eklendiğinde, boşluk sıvısının yüzey gerilmesini azaltır. Kritik eşik ötesinde SRA eklemek, sürfaktant moleküllerinin çözelti-hava yüzeyindense, çözeltide birikmesine yol açar. Aynı şekilde, eşik değer ötesinde,

boşluk sıvısının yüzey gerilmesinin daha fazla azalması önemsiz olur. SRA eklenmesi karışım suyunun polaritesini azaltır. Bu durum alkalilerin çekim kuvvetini azaltır ve ayrıca karışım suyunda çözümlerini ve iyonlaşmalarını da azaltır. Sonuç olarak boşluk sıvısı, düz çimento hamurunun boşluk sıvısına göre az oranda alkali iyonları içerir. Boşluk suyunun azalmış alkalinetisi çimento hidratasyonuna direkt etki yapar ve SRA'lı betonda hidratasyonun gecikmesine ve dayanım gecikmesine sebep olur [100].

Gecikmiş SRA eklenmesi (örneğin santralde değil de şantiyede eklemek) hidratasyon gecikmesini azaltmada yararlıdır. İlk karışım suyunda SRA eksikliği, alkalilerin çözülmesini artırır. Sonuç olarak yüksek alkali yoğunluğu, SRA ilk karışımdan sonra eklenirse sağlanır [96].

Kuruma rötresine iyi bilinen etkisine ek olarak SRA'lar kuruma profillerini ve taze çimento bazlı malzemelerin kuruma oranlarını, içsel bağıl neme, ilk zamanlardaki otojen deformasyonlara, boşluk ağlarındaki donma noktası düşüşlerini, boşluk çözeltisinin viskozitesini de etkiler. SRA'lar taze betondan buharlaşarak oluşan su kaybını azaltmada, otojen rötreyi azaltmada, plastik rötreye veya otojen deformasyona bağlı erken çatlamaları azaltmada kullanılır. SRA'lı numunelerdeki belirgin miktarda donabilen suyun (-15 derece civarında) soğuk iklim koşullarında yerleşimine ve kürlenmesine dikkat verilmesi gerekmektedir. Son olarak, boşluk çözeltisinin yüzey gerilimini azaltmaya ek olarak, SRA eklenmesi belirgin oranda boşluk çözeltisinin viskozitesini artırır. Bu durumun çimento bazlı malzemelerde zararlı iyonların (klor, sülfat, vb) difüzyon katsayılarını azaltmada yararlı sonuçları vardır [100].

SRA'ların çalışma mekanizmaları ve malzeme özelliklerini tartışmaları genellikle "kılcal kuvvet" çekme modeline atıfta bulunmaktadır. Gözeneklerde menisk oluşması, sırasıyla küçülme veya büzülme deformasyonuna neden olan kurutma gövdesinin gözenek duvarlarını çeken kılcal kuvvetler üretir. SRA'lar, gözenek solüsyonunun yüzey gerilimini düşüren organik yüzey aktif maddelerden oluşur. "Kılcal kuvvet" çekme modeli ile ilgili olarak, yüzey geriliminde bir azalmanın,

gözenekli gövdeye etki eden kılcal kuvvetleri azaltacağı ve bu durumda kurutma büzülmesini azaltacağı düşünülmektedir [96].

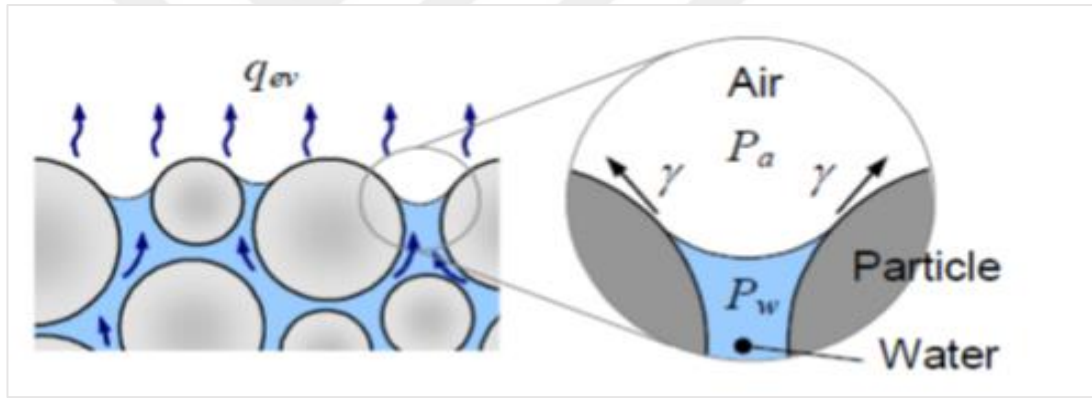
Gauss-Laplace denklemi gözenek sıvısındaki gerilmeyi hesaplamak için kullanılır:

$$\sigma_{\text{cap}} = \frac{2\gamma}{r}$$

σ_{cap} =gözenek sıvısındaki gerilme

γ =gözenek solüsyonunun yüzey gerilimi

r =en büyük su dolu silindirik gözenek yarıçapı



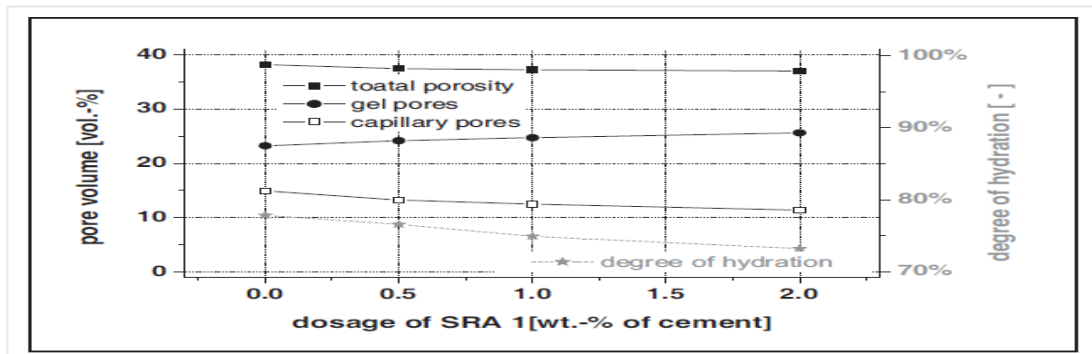
Şekil 2.31. Menisk oluşumunun illüstrasyonu [80].

Beton kuruduktan sonra veya kendiliğinden kurutulduğunda gözeneklerde menfez kavisler oluşur. Sıvı basıncı, meniskinin dışbükey kenarında olduğundan daha az olacağından, su meniskinin oluşması gözenek suyunda negatif basınç ve parçacıklar arasındaki kasılma kuvvetleri ile sonuçlanır [80]. Bu, gözenek bağıl neminde (RH) bir azalmaya neden olur, bu da iç kılcal basıncı artırır, duvarları birbirine çeker ve kuruma büzülmesine neden olur. Gauss-Laplace denkleminin incelenmesi, gözenek sıvısında gerilmeyi doğrudan etkileyen iki serbest değişkeni gösterir. Erken yaşlarda bile, çimento matrisinin gözenek yapısı iyi tanımlanmıştır, bu nedenle gözenek yarıçapı değiştirilemez hale gelir. Bununla birlikte, gözenek solüsyonunun diğer

serbest değişken yüzey gerilimi, rötre azaltıcı katkıları olarak adlandırılan kimyasallarla kontrol altına alınabilir [101].

Bazı bilim adamlarına göre beton karışımında SRA varlığı, kalsiyum hidroksit suda çözünürlüğünü azaltabilir; çözünürlük ne kadar düşük olursa, kalsiyum iyonlarının göçü de o kadar az olur, kalsiyum hidroksit dağılımı o kadar düşük olur. Bu da kristalizasyon nedeniyle daha yüksek gerilmelere neden olabilir ve erken yaş genişlemesine neden olabilir. Kalsiyum hidroksit çözünürlüğünün düşük olmasının, betonun genişlemesinin daha yüksek olduğunu bulmuştur [102].

Çimento esaslı malzemelerin, suyun dışardan adsorbe edilmesiyle toplu büzülme (kimyasal büzülme nedeniyle) telafi edilebileceği iyi bilinmektedir. Bu su kimyasal büzülme sırasında oluşan boşluğu kaplar. Bundan dolayı, su emişiyle toplu büzülme telafi etmek, kuruma büzülmesini etkilemek için jel gözenekliliğini artırır. Şekil 2.32 de yapılan bir çalışmada SRA içeren çimento macunun kılcal ve jel gözenekliliği arasındaki farkı gösteren bir çalışmanın sonuçları gösterilmiştir. Bu grafik SRA miktarı arttıkça jel gözenekliliğinin, kılcal gözenekliliğe oranının arttığı görülmektedir. SRA konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak değişen büzülme oranlarına rağmen, düşük büzülme içeren numuneler de dahil olmak üzere toplam gözenek alanlarında benzer oranlar görülmektedir [96]. Veriler, belirli bir porozite için kılcal ve jel gözenekleri arasındaki dağılımın değiştiğini göstermektedir. Daha spesifik olarak, SRA dozajının artması, jel gözenekliliğiyle masif gözenekliliğinin azaltılması yoluyla mikro yapıyı rafine ettiği görülmektedir [96].



Şekil 2.32. SRA'nın gözenekler üzerindeki etkisi [96].

3. MALZEME VE METOT

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

KYB numunelerin hazırlanması aşamasında karışımlarda, Baştaş Başkent Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş tarafından üretilen ve TS EN 197- 1 standartlarına uygun CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Karışımlarda kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	(%)
SiO ₂	19,38
Al ₂ O ₃	5,00
Fe ₂ O ₃	3,16
CaO	63,11
MgO	1,80
Na ₂ O	0,35
K ₂ O	0,91
SO ₃	3,16
Kızdırma Kaybı	3,07

3.1.2. Agregat

Bu çalışmada, KYB numunelerinin üretimi esnasında Ankara’nın Mamak İlçesine bağlı Kutludüğün köyündeki bir taş ocağından çıkarılan 0-4 mm boyutlarındaki kırma kum ve 4-11,2 mm boyutlarında kırmataş olmak üzere 2 çeşit agregat tipi kullanılmıştır. Kaba agregaların tane şekilleri ve tane boyut dağılımları, KYB’nin geçiş yeteneğini ve akışkanlığını etkilediğinden, agregat seçimine dikkat edilerek

kusurlu olmayan ve küresel agregalar karışımlarda kullanılmıştır. Agregalara ait TS EN 933-9 standardına göre metilen mavisi deneyi sonuçları Çizelge 3.2’de, TS EN 933-1 standardına göre yapılan çok ince malzeme muhtevası deneyi sonuçları Çizelge 3.3’te, TS EN 1097-6 standardına göre yapılan tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini deneyi sonuçları Çizelge 3.4’ te ve TS EN 933-1’e göre yapılan tane büyüklüğü dağılımları Çizelge 3.5 ve Çizelge 3,6’da verilmiştir. Agregaların gradasyon eğrileri ise Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir. Karışımlarda kullanılan agrega stoğu Şekil 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Metilen mavisi deney sonuçları

M_1	Deney Numunesi Kısımının Kütlesi	225,2 gr
V_1	İlave Edilen Boya Çözeltisinin Toplam Hacmi	15,0 ml
$MB=(V_1/M_1)*10$	Metilen Mavisi Değeri	0,67 g

Çizelge 3.3. Çok ince malzeme muhtevası deneyi sonuçları

Deney numunesi boyutu	Deney öncesi kuru ağırlık (W1)	Deney Sonrası kuru ağırlık (W2)	0,063 mm elekten geçen (W1-W2)	0,063 mm elekten geçen malzeme oranı (W1-W2)/ (W1)
0-4 mm	1000,6 g	886,1 g	114,5 g	% 11,44
4-11,2 mm	1239,7 g	1230,3 g	9,4 g	% 0,76

Çizelge 3.4. Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini deneyi sonuçları

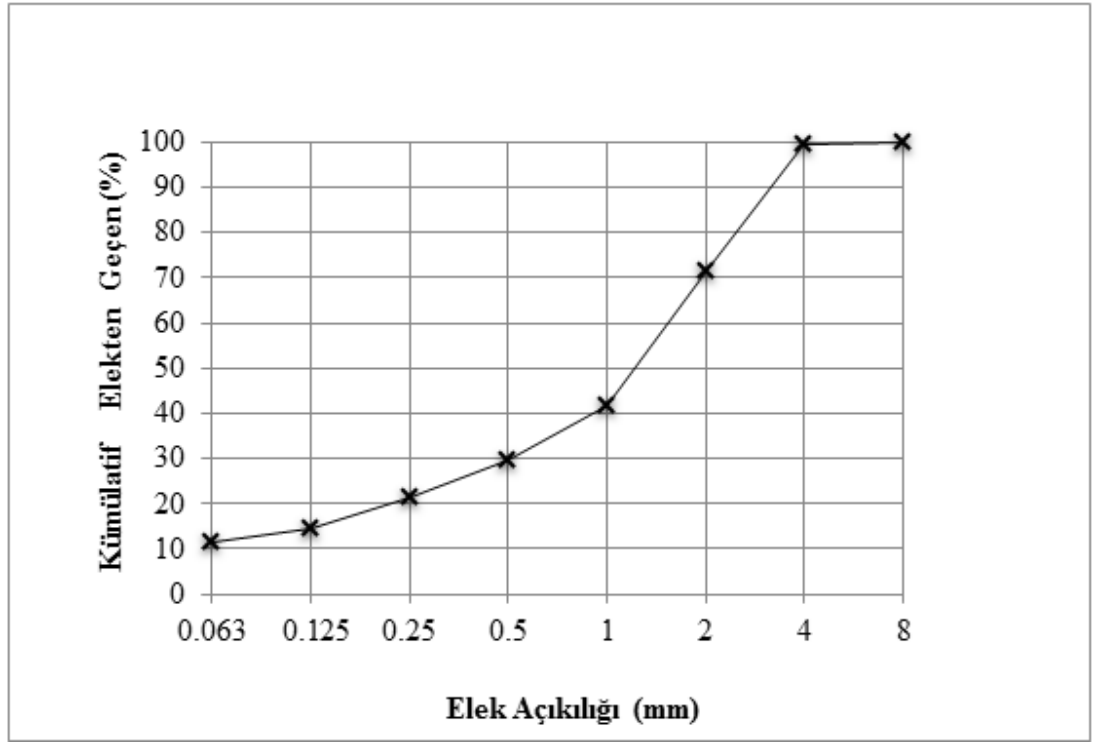
0-4 mm Kırnakum		Deney 1	Deney 2	Ortalama
Görünür Tane Yoğunluğu	mg/m ³	2,73	2,73	2,73
Etüvde Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu	mg/m ³	2,64	2,64	2,64
Doygun ve Yüzeyi Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu	mg/m ³	2,67	2,67	2,67
Su Emme Oranı	%	1,2	1,2	1,2
4-11,2 mm Kırmatas		Deney 1	Deney 2	Ortalama
Görünür Tane Yoğunluğu	mg/m ³	2,71	2,71	2,71
Etüvde Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu	mg/m ³	2,69	2,70	2,70
Doygun ve Yüzeyi Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu	mg/m ³	2,70	2,70	2,70
Su Emme Oranı	%	0,26	0,24	0,25

Çizelge 3.5. 0-4 mm agrega elek analizi sonuçları

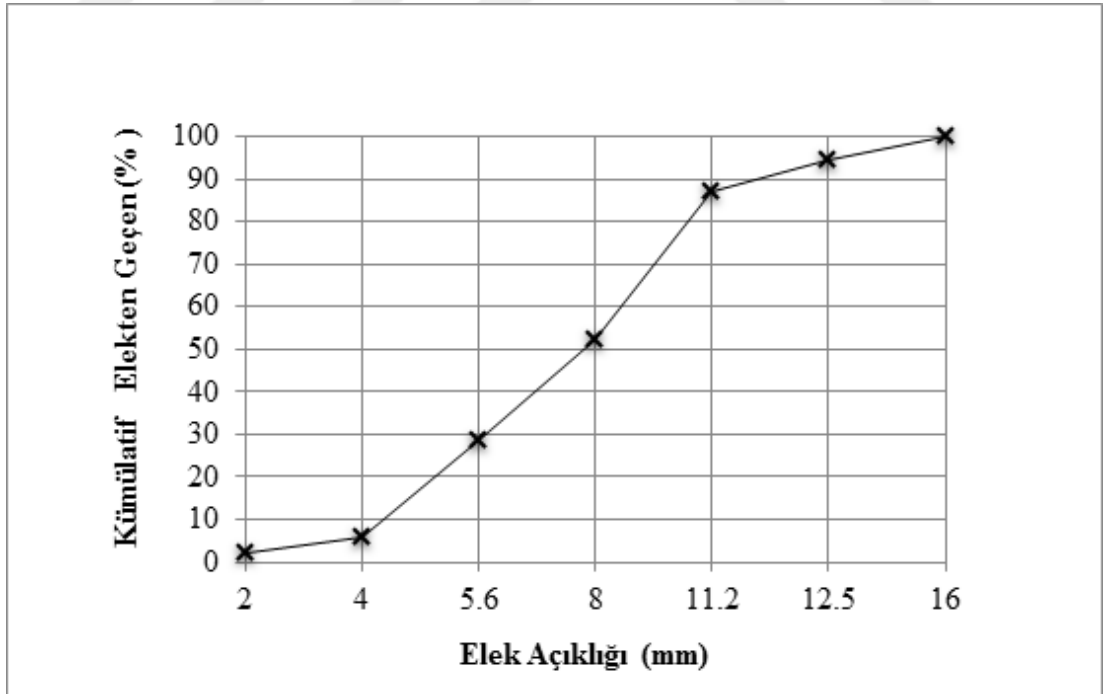
0-4 mm				
Elek Göz Açıklığı (mm)	Elekte Kalan (g)	Elekte Kalan (%)	Küm. Elekten Geçen (%)	Küm. Elekten Kalan (%)
8	0,0	0,0	100	0,0
5,6	0,0	0,0	100	0,0
4	3,4	0,3	99,7	0,3
2	281,5	28,1	71,5	28,5
1	297,1	29,7	41,8	58,2
0,5	123,2	12,3	29,5	70,5
0,25	82,2	8,2	21,3	78,7
0,125	69,5	6,9	14,4	85,6
0,063	30,7	3,1	11,3	88,7
Pan	113	11,3	0,00	100,0
Toplam	1000,6	100		
İncelik Modülü		3,2		

Çizelge 3.6. 4-11,2 mm agrega elek analizi sonuçları

4-11,2 mm				
Elek Göz Açıklığı (mm)	Elekte Kalan (g)	Elekte Kalan (%)	Küm. Elekten Geçen (%)	Küm. Elekten Kalan (%)
22	0,0	0,0	100	0,0
20	0,0	0,0	100	0,0
16	0,0	0,0	100	0,0
12,5	86,4	5,5	94,5	5,5
11,2	114,5	7,3	87,2	12,8
8	545,2	34,8	52,3	47,7
5,6	370,0	23,6	28,7	71,3
4	356,8	22,8	5,9	94,1
2	59,2	3,8	2,1	97,9
Pan	33,5	2,1	0,0	100,0
Toplam	1565,6	100		
İncelik Modülü			4,3	



Şekil 3.1. 0-4 mm agrega gradasyon grafiği



Şekil 3.2. 4-12 mm agrega gradasyon grafiği



Şekil 3.3. Karışımlarda kullanılan agrega stoğu

3.1.3. Su

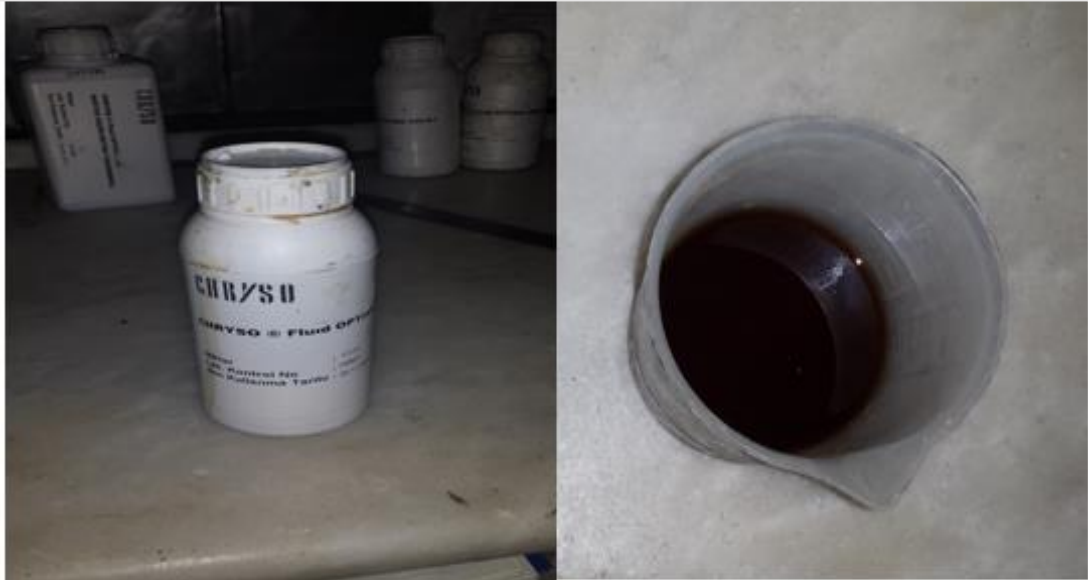
Elde edilen karışımlar için kullanılan suyun temiz ve betona olumsuz bir etkisinin olmaması gerekir. İçilebilir olan suların betonda kullanımı uygundur. Elde edilen karışımlar için ve kür havuzunda Ankara İli şehir içi şebekesinden elde edilen musluk suyu kullanılmıştır. Na_2SO_4 kür havuzunda ise Kırıkkale İli şehir içi şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.4. Akışkanlaştırıcı Katkı

Bu çalışmada KYB üretimi sırasında, TS EN 934-2 Ç3.1/Ç3.2 standardına uygun Şekil 3.4’de gösterilen Chryso Fluid Optima 284 adıyla üretilmiş, 100 kg çimento için 0,8 kg ile 2 kg arasında kullanım dozajı tavsiye edilen, yeni jenerasyon polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı, SA kimyasal katkı kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan SA katkının kimyasal özellikleri Çizelge 3.7’de verilmiştir

Çizelge 3.7. Karışımda kullanılan SA'nın kimyasal özellikleri

Ürün Adı	Chyrso Fluid Optima 284		
Ürün Tipi	Yüksek Oranda Su Azaltıcı/SA Kimyasal Katkı		
	Deney Sonucu	Analiz Standart Değerler	Deney Metodu
Görünüm	Homojen	Homojen	Gözle
Renk	Kahverengi	Kahverengi	Gözle
Yoğunluk(g/cm ³)	1,075	1,060-1,100	ISO 758
Ph	4,98	4,00-6,00	ISO 4316
Suda Çözünebilir Klor(%)	0,04	< %0,1	EN 480-10
Katkı Madde Miktarı(%)	30,44	28,97-32,02	EN 480-8
Alkali Miktarı	<%6	<%6	EN 480-12



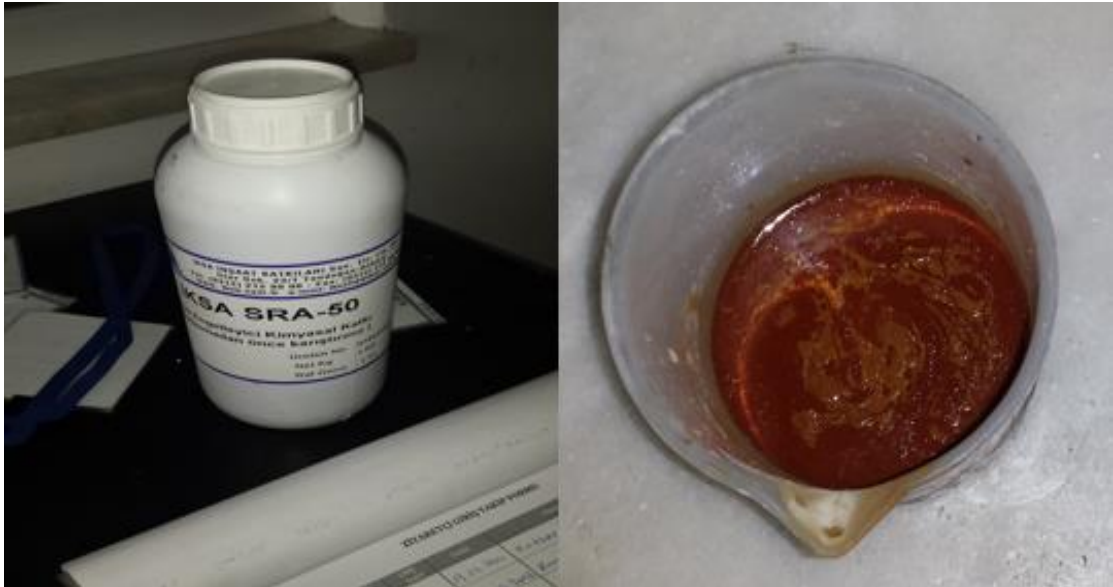
Şekil 3.4. KYB karışımlarında kullanılan SA katkı

3.1.5. Rötre Azaltıcı Katkı

Bu alışma kapsamında SRA'nın, KYB'de dayanım ve dayanıklılığa etkisi incelenmiştir. Rötre azaltıcı katkı maddesi olarak, şekil 3.5'de gösterilen SRA-50 ismiyle üretilen rötre engelleyici katkı maddesi kullanılmıştır. Bu katkı maddesine ait kimyasal özellikler izelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. SRA-50 katkısının kimyasal  zellikleri

Marka	İKSA SRA -50
Sınıf	Rötre Engelleyici Katkı
Görünüm	Kahve Renkli Viskoz Sıvı
Yoğunluk	1,40±0,03 kg/L
Ph	13,00±1
Standart	ASTM C 494, TS EN 934-2
Dozaj Aralığı	% 0,5 - % 2



şekil 3.5. KYB karışımlarında kullanılan rötre azaltıcı katkı maddesi

3.1.6. Sodyum Sülfat (Na_2SO_4)

Beton numunelerinin dayanıklılığı hakkında fikir edinebilmek için yapılan sülfat direnci ve ıslanma-kuruma çevrim deneyleri Na_2SO_4 çözeltisinde yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında kürde kullanılan Na_2SO_4 'e ait kimyasal özellikler Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Na_2SO_4 'ün kimyasal özellikleri

Yapılan Analiz	Analiz Sonucu	Spesifikasyon Değerleri	Analiz Metodu
Renk ve Görünüm	Beyaz Toz	Beyaz Toz	-
Yığın Yoğunluğu	1,46	1,3-1,6 g/cm ³	TS 525
Ph (%1'lik Solüsyon)	7	06-08	TS 4529
Na_2SO_4	99,54	min %99	TS 4528
Nem	0,01	max %0,04	TS 4442
Suda Çözünmeyen Madde	0,01	max %0,1	TS 1866
NaCl	0,4019	max %0,5	TS 4444
Ca	0,0229	max %0,15	TS 6640
Mg	0,0199	max %0,02	ISO 3238-1975
Fe(Toplam)	-	< 10 ppm	TS 5509

3.2. Metot

3.2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada, TS 802 (Mart, 2016) beton karışım tasarımı hesap esasları standardının 6. Bölümünde açıklanan, KYB için karışım tasarım prensipleri göz önünde bulundurularak çimento dozajı, su ihtiyacı, s/ç oranı, kimyasal katkı oranları, optimum ince ve kaba agregâ oranları gibi etkenler ön deneylerle belirlenerek beton tasarımı gerçekleştirilmiştir. KYB deney numuneleri Sigma Beton laboratuvarında hazırlanmıştır.

Numunelerde bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Agregâ olarak, 0-4 mm boyutlarında, yoğunluğu $2,67 \text{ g/cm}^3$, su emmesi %1,2, incelik modülü 3,2 olan kırma taş ve 4-11,2 mm boyutlarında, yoğunluğu $2,70 \text{ g/cm}^3$, su emmesi %0,25, incelik modülü 4,3 olan kırma taş olmak üzere 2 çeşit kırma taş agregâ kullanılmıştır. Karışımlarda Ankara iline ait şebeke suyu kullanılmıştır.

Bu çalışma esnasında malzemelerin değişiklik göstermemesi için, KYB üretiminde kullanılacak olan tüm malzemeler laboratuvar ortamında depolanan, aynı malzeme stoğundan kullanılmıştır. Yapılan çalışmada tüm karışımlar için, ön deneylerle belirlenen 0,45 s/ç oranı ve 400 kg/m^3 çimento miktarı sabit tutulmuştur. KYB’de üretici firmanın tavsiye ettiği dozaj aralığında, çeşitli denemeler yapılması sonucunda % 0,95 oranında SA kullanılmış olup, bu numuneler kontrol numunesi olarak kullanılarak, KYB0 olarak adlandırılmıştır.

KYB’ye SRA ilave edilerek hazırlanan numunelerde ise optimum SRA dozajını belirlemek için farklı oranlarda SRA kullanılmıştır. Bu numunelere, çimento miktarının %0,8 , %1,0 ve %1,2 oranında SRA eklenmiş ve bu betonlar sırasıyla KYB0,8, KYB1, KYB1,2 olarak adlandırılmıştır. Yapılan taze KYB deneyleri ve 2 günlük basınç deneyleri sonucunda % 1,0 SRA oranı optimum dozaj olarak belirlenmiş ve KYB1 betonu ile çalışmalara devam edilmiştir. Karışımların

içerdikleri katkı oranına göre isimlendirilmesi hakkındaki bilgiler Çizelge 3.10’da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Karışımların kodlandırma şeması

Numune Kodu	SA	SRA
KYB0	% 0,95	-
KYB0,8	% 0,95	% 0,8
KYB1	% 0,95	% 1,0
KYB1,2	% 0,95	% 1,2

Tüm karışım numuneleri hazırlanırken, çimento ve agregalar ilk olarak Şekil 3.6’da gösterilen beton mikserine eklenmiş, homojen bir karışım sağlanıncaya kadar karıştırılmıştır. Su, SA ve SRA daha sonra mikser çalışırken karışıma eklenmiş ve karıştırma işlemi, istenen kıvama gelene kadar devam ettirilmiştir.



Şekil 3.6. Karışımları hazırlamada kullanılan beton karışım mikseri

Basınç deney numuneleri için 150x150x150 mm boyutlarında küp numune kalıpları kullanılmıştır. Numuneler, herhangi bir sıkıştırma işlemi ve vibrasyon uygulanmadan tek seferde küp kalıplara yerleştirilmiştir. Eğilme deneyi ve rötre deneylerinde 100x100x500 mm ölçülerinde prizmatik ki kiriş kalıplar kullanılmıştır. Kısıtlanmış rötre deneylerinde ise halka kalıplar kullanılmıştır. Şekil 3.7’de deneylerde kullanılan kalıplar gösterilmiştir. Taze beton deneyleri ise numunelerin karışım işlemi sona erdikten hemen sonra yapılmıştır. KYB beton numuneleri hazırlanırken kullanılan beton karışımlarına ait özellikler Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.11. KYB karışımlarına ait özellikler (1m³ için)

	KYB0	KYB0,8	KYB1	KYB1,2
Çimento(kg)	400	400	400	400
Su (kg)	183	183	183	183
Taş tozu (kg)	162	162	162	162
Kırmataş1 (kg)	967	963	962	961
Kırmataş2 (kg)	671	669	668	668
SA katkı (kg)	3,8	3,8	3,8	3,8
SRA katkı (kg)	-	3,2	4	4,8
Toplam (kg)	2386,8	2384	2382,8	2382,6
s/ç	0,45	0,45	0,45	0,45



Şekil 3.7. Basınç, eğilme ve rötre deneylerinde kullanılan kalıplar

3.2.2. Taze Beton Deneyleri

KYB'nin taze özelliklerini değerlendirmek için farklı deney metotları geliştirilmiştir. Bu deney metotlarının birkaçının aynı anda yapılması, taze beton özelliklerini belirlemede daha etkili olacaktır. Bu çalışmada KYB numuneleri için yapılan taze beton deneyleri, KYB serilerinin akıcılık, geçme yeteneği ve ayrışmaya karşı direnç özelliklerini sağlayıp sağlamadığını kontrol etmek için uygulanmıştır. Ayrıca taze beton deneyleri, SRA kullanılarak üretilen KYB0,8, KYB1 ve KYB1,2 betonlarında optimum katkı dozajını belirlemede yardımcı bir kriter olarak kullanılmıştır. Taze beton deneyleri olarak çökme-yayılma deneyi ve T500, V hunisi deneyi ve L kutusu deneyleri yapılmıştır.

3.2.2.1. Çökme-Yayılma Deneyi

Çökme yayılma deneyinde standart çökme hunisi ve çap sınırları sırasıyla tabla üzerinde işaretlenmiş yayılma tablası kullanılmıştır. Çökme hunisi Şekil 3.8'de görüldüğü gibi yatay bir şekilde düz bir zemine yerleştirilerek, kalınlığı en az 2 mm olan ve yüzey alanı en az 900 x 900 mm olan yayılma tablasının merkezine konumlandırılır. Yayılma tablasının yüzeyi çalışma öncesi temizlenerek deneye hazır hale getirilmiştir. Numuneler kendiliğinden yerleşebilir özelliklere sahip olduğundan, çökme hunisine herhangi bir sıkıştırma uygulanmaksızın doldurulmuştur.

Çökme hunisi yere dik olacak şekilde kaldırılarak, betonun yayılmasının sona erdiği kanısına varılınca, betonun tablada kendi ağırlığı ile ne kadar yayıldığı, birbirine dik 2 noktadan D1 ve D2 yayılma çapları ölçülerek kaydedildi. D1 ve D2 yayılma çaplarının aritmetik ortalaması, yayılma çapı olarak alındı. T 500 deneyinde ise betonun tabla üzerinde işaretli 500 mm sınırına kaç saniyede ulaştığı, 0,1 saniye hassasiyetle ölçüm yapan kronometre ile ölçülüp kaydedilmesiyle bulunmuştur.



Şekil 3.8. Çökme-yayılma deneyi ve yayılma çapının ölçülmesi

3.2.2.2. V Hunisi Deneyi

İlk olarak V hunisinin içi ve alttaki kapağı temizlenerek nemli duruma getirildi. Taze beton Şekil 3.9’da görülen V hunisinin üst yüzeyine kadar, KYB’nin kendiliğinden yerleşebilen özelliği ve vibrasyon enerjisine ihtiyaç duymaması nedeniyle herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmaksızın doldurulduktan sonra, beton üst yüzeyi, huni üst seviyesi ile aynı hizaya kadar düzeltilmiştir. V hunisi aparatının altına dökülen betonu muhafaza etmek için bir kap konuldu. Doldurma işlemi bittikten sonra 10 ± 2 sn beklenilerek, V hunisinin kare şeklindeki kapağı açılarak ve beton kendi ağırlığı altında boşalmaya bırakıldı. Deney süresince betonun blokaja uğrayıp uğramadığı kontrol edildi. V hunisinin üst kısmından bakıldığında, alttaki kabın ilk görüldüğü ana kadar geçen süre 0,1 saniye hassasiyetle ölçüm yapan kronometre ile ölçülüp, t_v hesaplanıp kaydedildi. Betonun V hunisinden, alttaki kaba geçiş süresi t_v , betonun akma süresi ve akış hızı olarak belirlendi.



Şekil 3.9. V hunisi deneyi yapılışı

3.2.2.3. L Kutusu Deneyi

L kutusunda betonun geçme kabiliyeti ölçülmüştür. L kutusu aparatı, düz ve yatay bir zemine konumlandırılmıştır. Deneyde Şekil 3.10’da gösterilen, donatı çapı 12 mm ve donatı aralıkları 41 mm olan, 3 çubuklu engel teşkil eden deney düzeneğine sahip L kutusu kullanılmıştır. Taze beton, L kutusunun dikey bölümünün üst yüzeyine kadar herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmaksızın doldurulduktan sonra beton üst yüzeyi, L kutusunun üst seviyesi ile aynı hizaya kadar düzeltildi. Doldurma işlemi bittikten sonra 60 ± 10 sn. beklenildikten sonra transfer kapısı açılarak taze betonun donatı çubukları arasından kendi ağırlığı ile yatay kısma ilerlemesi beklenmiştir. Taze betonun ilerlemesi durduğunda yatay kısımdaki betonun yüksekliği 3 noktada ölçülerek ortalaması alınıp ve h_2 olarak kaydedildi. Dikey kısmında ise transfer kapağının arkasındaki beton yüksekliği aynı metotla ölçülür ve h_1 olarak kaydedilmiştir. Betonun geçme oranı h_2/h_1 ile hesaplanarak tamamlanmıştır. Deney sonucunda h_2/h_1 oranının standartlarda belirtilen 0,8-1,00 arasında olup olmadığı kontrol edilmiştir.



Şekil 3.10. L kutusu deneyi yapılışı

3.2.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri

KYB'ler genellikle taze beton sonuçlarına göre sınıflandırılır aynı zamanda KYB'den yüksek mekanik performans da beklenmektedir. Bu çalışmada, kontrol KYB ve SRA katkılı sertleşmiş KYB'lerde basınç dayanım tayini, eğilme dayanımı tayini, yüzey sertliğinin belirlenmesi için schmidt çekici deneyleri yapılmıştır.

3.2.3.1. Basınç Dayanımı Tayini

Bu çalışmada basınç dayanımı tayini, TS EN 12390-3'e göre yapılmıştır. KYB'ler de taze beton deneyleri sonucu işlenebilirlik ve kendiliğinden yerleşme standartları yakalandıktan sonra, ilk olarak KYB0, KYB0,8, KYB1 ve KYB1,2 betonları için 2 günlük basınç dayanımı tayinleri, her bir seriden 3'er adet numune üzerinde uygulanmıştır.

Deneylerde 150x150x150 mm ölçülerinde küp numuneler kullanılmıştır. Numuneler, Şekil 3.11'de görülen TS EN 12390-4'e uygun, Tonipact 1000 model, 2000 kN kapasiteli, hidrolik beton pres makinasında kırılıncaya kadar, yükleme hızı

0,2 Mpa/s–1,0 Mpa/s arasında sabit bir yükleme hızı seçilerek yüklenmiş olup ve taşıyabileceği maksimum yük belirlenerek beton basınç dayanımları hesaplanmıştır.

Basınç dayanımı aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\sigma = P/A$$

Bu formülde ;

σ : Maksimum basınç gerilmesi (N/mm²) ,

P: Yük miktarı (kırılmaya yol açan maksimum yük)(N),

A: Numunenin kesit alanı (mm²),dir.

Yapılan 2 günlük basınç deneyleri sonunda, basınç sonuçlarının aritmetik ortalamaları alınarak, ortalama basınç dayanımları hesaplanmıştır. Bu 2 günlük basınç dayanımı sonuçları, taze beton deneyleri sonuçları da göz önünde bulundurularak SRA katkısının optimum dozajını belirlemek için bir kriter olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Tonipacat marka hidrolik beton pres makinası

Daha sonra bir grup KYB0 ve KYB1 betonlarının Şekil 3.12’de görüldüğü gibi normal su küründe, deney günlerine kadar bekletilmek üzere 2, 7, 28, 60, 90 ve 180. günlerde basınç dayanımı tayinleri, her bir deney günü için serilerden 3’er adet numune üzerinde, basınç dayanım sonuçlarının aritmetik ortalamaları alınarak, ortalama basınç dayanımları hesaplanmıştır.



Şekil 3.12. Su küründe bekletilen KYB numuneleri

Numunelerin belirli bir dayanım potansiyeline ulaşması için ilk 28 gün normal su küründe, daha sonra %10 Na_2SO_4 küründe ıslanma-kuruma çevrimleri (IKÇ) uygulanan ikinci grup KYB0 ve KYB1 betonlarının basınç dayanım tayinleri ise, her bir deney günü için serilerden 3’er adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deney günleri geldiğinde numuneler, basınç deney makinasında kırılincaya kadar yüklenmiş ve taşıyabileceği maksimum yük belirlenerek beton basıncı hesaplanmış ve her bir gün için numunelerin basınç dayanım sonuçlarının aritmetik ortalamaları alınmıştır.

3.2.3.2. Eğilme Dayanımı Tayini

KYB numunelerinde eğilme dayanımı deneyleri yapılırken, TS EN 12390 -1'e uygun 100X100x500 mm ölçülerinde prizma şekilli kiriş numuneler seçilmiştir. KYB'ler de eğilme dayanım deneyleri, deney gününe kadar su küründe bekletilen KYB0 ve KYB1 beton numunelerinin 2, 7, 28, 60, 90 ve 180. deney günlerinin her biri için serilerden 3 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.

28 gün normal su küründe bekletilen daha sonra, %10 Na₂SO₄ küründe ıslanma-kuruma çevrimleri uygulanan KYB0 ve KYB1 beton numunelerinin 60, 90, 135 ve 180. gün eğilme dayanımları ise, her bir seriden 3 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir gün için numunelerin aritmetik ortalama değerleri alınmıştır. Farklı kür koşullarında saklanan numuneler, deney günlerinde bekletilen kür havuzlarından çıkartılarak, numune yüzeyinde ki fazla sudan arındırılarak, yaklaşık yarım saat beklendikten sonra eğilme deneyi makinasına yerleştirilmiştir. Yükleme düzeneği olarak, yerleştirildikleri mesnetin orta noktasından yükleme düzeneği seçilmiştir. Darbe etkisi oluşturulmadan, TS EN 12390-5'de belirtilen şekilde 0,04-0,06 MPa/s arasında yükleme hızı seçilerek, sabit gerilme artış hızı sağlanacak şekilde yük uygulanmıştır. Digital göstergede okunan en büyük değer seçilerek, eğilme mukavemeti hesaplanmıştır.

3.2.3.3. Schmidt Çekici Deneyi

Basınç dayanımını tahmin etmekte kullanılan tahribatsız yöntemlerden birisi olan Schmidt çekici deneyi, su küründe KYB0 ve KYB1 numuneleri için 28, 45, 90 ve 180. günler için uygulanmıştır. Bu yöntemde vuruş açısı test sonuçları için büyük önem taşımaktadır. Test çekici, numune yüzeyine dik bir şekilde yerleştirilerek uygulanmıştır. Numuneler kür ortamından çıkarılarak, belirli süre yüzey nemini kaybetmesi için beklendikten sonra okumalar yapılmıştır. Deneylerde Şekil 3.13'te gösterilen N tipi test çekici kullanılmıştır. Numunelerde okuma yapılırken karelaajlar yapılarak bir numune için 10 kez schmidt çekici okuması yapılmış ve bunların aritmetik ortalaması alınarak numunelerin geri tepme değerleri (R) ölçülmüştür. Test

çekici belirli aralıklarla, kalibrasyon örsünde kalibre ederek ölçümlerde kontrol sağlanmıştır. Schmidt çekici deneyi sonuçlarından, numunelerin yüzey sertlikleri hakkında bilgi elde edilerek, basınç deney sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 3.13. Schmidt test çekici uygulaması

3.2.4. Rötire Deneyleri

Rötire deneylerinde kontrol KYB ve % 1 oranında SRA katkılı numuneler deformasyon ölçümleri için 3 farklı kür koşulunda deneyler yapılmıştır. Su küründe Negatif Rötire, Hava küründe Kuruma Rötresi, %10 Na₂SO₄ çözeltisi içerisinde ıslanma-kuruma çevrimlerine tabi tutularak sülfat direnci ve boy değişim ölçüm deneyleri yapılmıştır. Ayrıca halka numuneler kullanılarak kısıtlanmış rötire deneyleri yapılmıştır. KYB’lerde SRA katkısının, farklı kür koşullarında boy değişimine etkisi ve halka numunelerde çatlak genişliği ve gelişimi üzerine etkisi incelenmiştir.

Rötire deneyleri ASTM C 157’de “Sertleşmiş hidrolik çimento harcı ve betonun uzunluk değişimi için standart deney metodu” belirtilen koşullar gözönünde bulundurularak yapılmış. Standart da belirtildiği gibi numuneler kare en kesitli

seçilmiştir. Laboratuvarında ki saklama koşulları standartta belirtilen sıcaklık kriterini sağladığı fakat bağıl nem ve hava hareketi kriterleri çalışma koşulları içinde seçilmiştir. Hem kontrol KYB, hem SRA katkılı KYB karışımlar aynı koşullara maruz kaldığı için rötrede ki ölçülen farklılıklar karışımların mukayesesine karar vermek için geçerli bir zemin oluşturur. Bir boyutu, diğer boyutuna göre daha uzun olan numunelerde rötre olayının, numunenin uzun olan kısımda olacağı düşünülerek, rötre deformasyonları lineer olarak ölçülmüştür. Rötre deneylerinde boy değişimlerini ölçmek için deneylerde, standarttan farklı olarak 100x100x500 mm ölçülerinde prizmatik kiriş numuneler kullanılmıştır. Boy değişim okumaları yine ASTM C 157 standartında belirtildiği gibi, 0,001 mm hassasiyetli digital boy ölçüm cihazlarında yapılmış ve birim deformasyonlar aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$\Delta L_x = \frac{L_{ilk} - L_{son}}{L_{ilk}} \times 100$$

Formülde :

ΔL_x =% boy değişimi

L_{ilk} : Numunenin ilk ölçülen boy uzunluğu

L_{son} : Numunenin son ölçülen boy uzunluğu

Şekil 3.14’de görüldüğü gibi kiriş kalıpların her iki ucunda, betonları ölçüm cihazına yerleştirmek için çelik pimler bulunmaktadır. Beton döküldükten sonra beton içerisinde kalan pimler vasıtasıyla, numuneler Şekil 3.15’de gösterilen ölçüm cihazına yerleştirilir. Rötre deneylerinde okumalar yapılırken, numuneler ölçüm yapılan yönü tarafından işaretlenmiş ve digital ölçüm cihazına her seferinde aynı yöünden ve yatay olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 3.14. 100*100*500 mm boyutlarında pimli prizmatik kiriş numunesi kalıbı



Şekil 3.15. Digital boy ölçüm cihazı

3.2.4.1. Negatif Rötire (Şişme) Deneyi

Beton numunelerinin devamlı olarak su içerisinde bırakılmasıyla betonların hacimlerinde ve ağırlıklarında bir miktar artış meydana gelmektedir. Beton numunelerinin gösterdiği bu hacim artışına “şişme” veya “negatif büzülme” denilmektedir.

Negatif rötire deneyinde 100x100x500 mm boyutlarında kontrol KYB numunesi ve %1 SRA katkılı numunelerin boy değişim ölçümleri yapılmıştır. Her iki numune de 24 saat sonra kalıptan çıkarıldıktan sonra laboratuvar koşullarında su küründe bekletilmiştir. 2, 7, 28, 45, 90, 135 ve 180. günlerde boy değişim ölçümleri Şekil 3.16’da görüldüğü gibi 0,001 mm hassasiyetli digital boy değişim cihazı ile yapılmıştır. Ölçüm yapıldığı gün, kürden çıkarılan numunelerin boy ölçümleri, 30 dakika sonra yapılmış ve ölçümlerin akabinde bir sonraki ölçüm gününe kadar tekrar su kürüne bırakılmışlardır. Her bir ölçüm noktası için kontrol ve SRA katkılı iki adet numunede ölçümler yapılırken, her bir güne ait 3 boy değişim okuması yapılmış ve aritmetik ortalamaları alınarak boy değişimleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.16. Digital boy ölçüm cihazında ölçüm yapılması

3.2.4.2. Kuruma Rötresi Deneyi

Sertleşmiş beton numunelerinin kurumaya maruz bırakılarak, hacminde meydana gelen değişim olarak tanımlanan kuruma rötresi deneyi yapılırken, Şekil 3.17’de gösterildiği gibi 100x100x500 mm boyutlarında prizmatik kiriş kalıpları kullanılmıştır. Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılma işleminin ardından, daha sonra laboratuvar ortamında ki sıcaklık ve nem koşullarında, $23\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\%50\pm 5$ bağıl nem ortamında muhafaza edilmiş kurumaya maruz bırakılmışlardır. Kuruma işlemine bırakıldıktan sonra 2, 7, 28, 45, 90, 135 ve 180. günlerde 0,001 mm hassasiyetli digital boy değişim ölçüm cihazı ile boy değişim ölçümleri yapılmıştır. Her bir ölçüm noktası için kontrol ve SRA katkılı ikişer adet numunede ölçümler yapılırken, her bir güne ait 3 boy değişim okuması yapılmış ve aritmetik ortalamaları alınarak boy değişimleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.17. Kuruma rötresi deneyi için hazırlanmış numune

3.2.4.3. Islanma-Kuruma ve Sülfat Direnci Deneyi

Betonun uğradığı en agresif çevresel koşullardan biri olan, ıslanma-kuruma çevrimleri ile sülfat direncinin birlikte boy değişimine yaptığı kombine etki incelenmiştir. Islanma-kuruma çevrimleri (IKÇ) ve sülfat etkisinin meydana getirdiği hacim değişikliklerini belirlemek amacıyla 100x100x500 mm boyutlarında prizmatik kiriş numune kalıpları kullanılmıştır.



Şekil 3.18. Islanma-kuruma ve sülfat direnci deneyi yapılışı

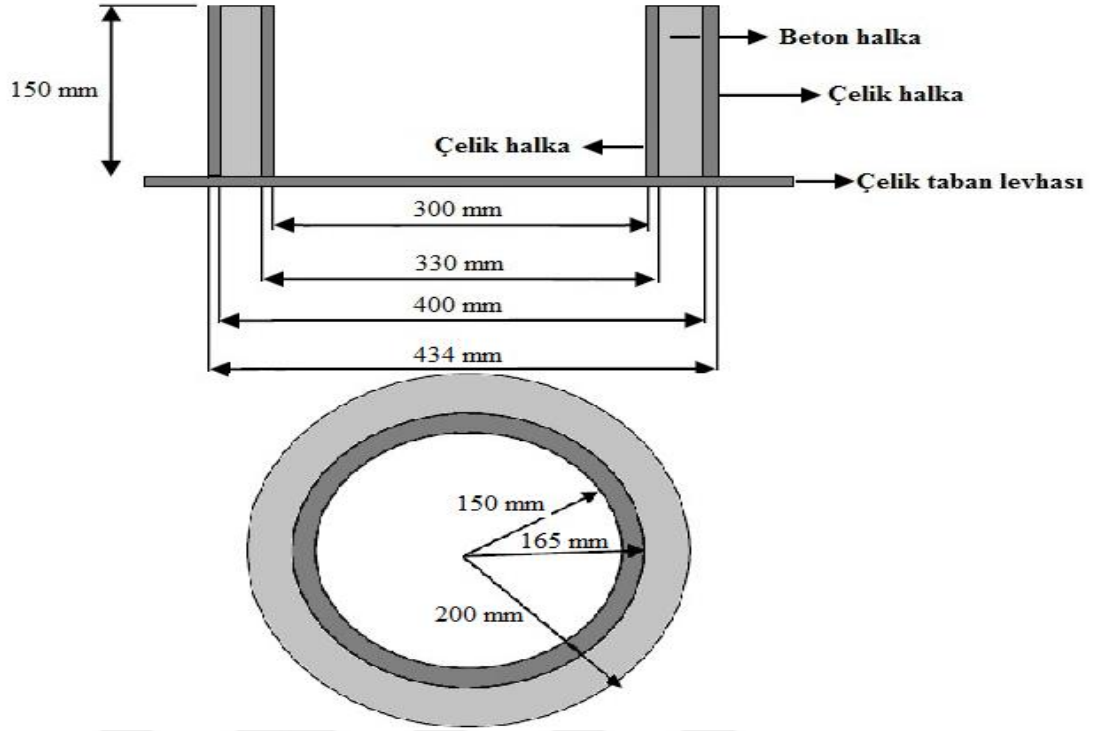
Sülfat çözeltisine batırılmış harç çubuklarının uzunluk değişiminin belirlenmesini kapsayan ASTM C 1012’de sülfatlarla ilgi çevresel maruz kalmayı taklit etmek için, sülfat çözeltisinin derişimi hakkında 50 g/L olarak öneri sunulmuştur. Bu oranın harçlar için önerilmesi, çalışmamızda beton numuneler kullanılması ve yapılan literatür taramalarında bu oranın sülfat direncini tayin etmede etkisiz kaldığı olgusuyla Na_2SO_4 çözeltisinin derişimi 100 g/L olarak seçilmiştir. Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılma işleminin ardından, %10 Na_2SO_4 çözeltisine bırakılmış ve IKÇ’ye maruz bırakılmışlardır. 3 gün Na_2SO_4 çözeltisinde ıslanmaya maruz bırakılan numuneler, daha sonra çözeltiden çıkarılarak laboratuvar koşullarında 3 gün kurumaya maruz bırakılmışlardır. Boy değişim okumaları, her seferinde ıslanma çevrimlerinden sonra yapılmıştır. 3, 9, 27, 45, 93, 135 ve 183. günlerde 0,001 mm

hassasiyetli digital boy değişim ölçüm cihazı ile boy değişim ölçümleri yapılmıştır. Her bir ölçüm noktası için kontrol ve SRA katkılı iki adet numunede ölçümler yapılırken, her bir güne ait 3 boy değişim okuması yapılmış ve ortalamaları alınarak boy değişimleri hesaplanmıştır.

Şekil 3.18’de görüldüğü gibi numunelerin kenarlarından dökülmelerin başlaması, numunelerin köşelerden başlayarak zaman içinde yüzeylerinin beyazlaşması gibi fiziksel değişimleri de periyodik zaman aralıkları ile gözlenerek dayanıklılık unsurları incelenmiştir. Deney süresince belirli zaman aralıkları ile çözeltinin pH’ı, pHmetre ile ölçülmüş ve pH’nın değişmesi sebebiyle çözelti ortamı belirli aralıklarla yenilenmiştir.

3.2.4.4. Kısıtlanmış Rötire Deneyi

Betonun çatlama potansiyelini değerlendirmek için kullanılan bir deney metodu olan halka deneyi, fazla sayıda malzemenin tespiti için kısa zamanda çatlak oluşturma yeteneğinden dolayı bu çalışmada kullanılmıştır. Kısıtlanmış rötire deneyleri yapılırken ASTM C 1581-04 ve AASHTO PP34-99 standardında ki esaslar göz önünde bulundurulmuştur. Deneylerde Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü beton baboratuvarından temin edilen halka numune kalıpları kullanılmıştır. Şekil 3.19’da gösterilen kalıbın iç çapı 300 mm, dış çapı 434 mm, yüksekliği 150 mm, iç çelik halkanın et kalınlığı 15 mm, dış çelik halkanın et kalınlığı 17 mm, beton halkanın et kalınlığı 35 mm’dir.



Şekil 3.19. Kısıtlanmış rötre halka kalıbın kesiti

Bu test yöntemi materyallerin nispi olarak karşılaştırılması içindir ve her ne kadar numunelerin çatlama yaşı belirlense de, herhangi bir yapı, harç veya betonun çatlamasında ki yaşı belirleme amacı taşımayan, yalnızca mukayese için yapılmıştır. Kontrol ve SRA katkılı KYB numuneler için 2’şer adet olmak üzere halka numuneler hazırlanmıştır. Betonlar kalıba yerleştirilirken herhangi bir vibrasyon enerjisi uygulanmadan doldurulmuştur. Numuneler 24 saat sonra, dış çelik halka kalıptan ayrılarak, kısıtlama görevi sadece iç çelik halka tarafından uygulanması sağlanmıştır. Numuneler deney süresince laboratuvar koşullarında 23 ± 2 C° ve $\%50 \pm 5$ bağıl nem ortamında muhafaza edilmiş ve kurumaya bırakılmışlardır. Halka üst düzeyi silikon ile kaplanarak, yalnızca halkanın dış çevresel yüzeyi kurumaya maruz bırakılmıştır. Beton halkanın iç çevresel yüzeyi, iç kısımda ki çelik tarafından sarıldığından, beton halkanın alt yüzeyi, çelik taban üzerinde durduğundan kurumaya maruz kalmamıştır. Dairesel halka numunelerde çevrenin eksenel simetrik geometrisinden dolayı, eşit olasılıklı çatlama potansiyeline sahip olduğundan, çatlamanın yerini tahmin etmek mümkün olmaz. Deney süresince numuneler de ilk çatlağın başlangıç süresi gözlenmiş, çatlaklar oluşuktan sonra çatlak genişliği

gelişimi, belirli aralıklarla takip edilerek çatlama potansiyelleri belirlenmiştir. Çatlak genişliği ölçümü için 0,02 mm hassasiyetinde ölçüm yapabilen, optik çatlak mikroskopu kullanılmış ve çatlak görüntüleri fotoğraflanmıştır. Çatlak genişliklerinin hesabında, her bir halka numunesinde 3 ayrı noktadan ölçüm yapılarak kaydedilmiş ve bunların ortalaması alınarak belirlenmiştir. Daha sonra 2'şer adet numunenin çatlak genişliklerinin ortalaması alınarak ortalama çatlak genişliği hesaplanmıştır.

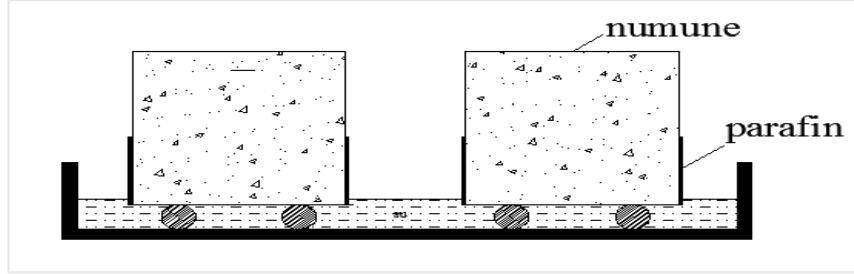


Şekil 3.20. Halka deneyi uygulama aşaması

3.2.5. Kılcal su emme deneyi

Betonda ki dayanıklılık problemlerinden biri de dış ortamda ki su, sülfat, klorür gibi iyonların kılcal boşluklar yardımıyla beton içerisine nüfuz etmesidir. Kontrol ve SRA katkılı KYB'lerin kılcal su emme kapasitelerini belirlemek için 150x150x150 mm ölçülerinde küp numuneler kullanılmıştır. Deneyde 90 gün normal su küründe bekletilen numuneler, kür ortamından çıkarıldıktan sonra 24 saat süreyle 105 C°' de etüvde bekletilerek, etüv kurusu durumuna getirilmiştir. Daha sonra numunelerin sadece alt taban kısmından su geçişine izin vermek için, yan kısımları suyla temas etmeyecek şekilde parafin malzemesi ile izole edilmiştir. Alttan su transferini

sağlamak için demir çubuklar ile mesnetler oluşturulmuştur. Numuneler su ile temas edecek şekilde bu mesnet üzerine yerleştirilerek Şekil 3.21’de gösterilen deney düzeneği kurulmuştur.



Şekil 3.21. Kılcal su emme deneyi düzeneği

Numuneler 1, 3, 5, 10, 20, 30, 60, 90 ve 120 dakika zaman aralıkları sonunda deney düzeneğinden alınıp tartılarak ne kadar su absorbe ettikleri belirlenerek, kılcal su emme katsayıları aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$\frac{Q}{A} = k \times \sqrt{t}$$

k : Kılcallık katsayısı (cm/ $\sqrt{s}$)

Q: Beton tarafından emilen toplam su miktarı (cm³)

A: Suyla temas eden beton numunesinin taban alanı (cm²)

t : Beton numunesinin suyla temas ettiği süre (sn)



Şekil 3.22. Kılcal su emme deneyi yapılışı

3.2.6. SEM analizi

Su küründe bekletilen ve %10 Na_2SO_4 küründe IKÇ'ye tabi tutulan 135 günlük KYB0 ve KYB1 numunelerinden, genellikle iç kısma yakın tarafından küçük boyutta parçalar alınarak, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. SEM görüntüleme işlemleri Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. SEM görüntüleme cihazı olarak, voltaj aralığı 200 V - 30 kV olan Quanta 450 FEG marka ve modelli taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Her bir numunede x500, x1000, x2000, x4000, x8000 ve x16000 kat büyütme görüntüleri elde edilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Taze Beton Özellikleri

KYB'nin kendiliğinden yerleşebilirlik standartları olarak belirlenen, doldurma, geçme ve ayrışmaya karşı direnç kabiliyetlerini belirlemek için yapılan çökme-yayılma ve T500, V hunisi ve L kutusu taze beton deneylerinin sonuçları verilmiştir.

4.1.1. Çökme-Yayılma ve T500 deneyi sonuçları

Kendiliğinden yerleşebilme için yayılma ve betonun viskozitesi gibi parametreler hakkında fikir veren çökme-yayılma ve T500 deneyi sonuçları Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çökme-yayılma ve T500 deneyi sonuçları

Deney	KYB0	KYB0,8	KYB1	KYB1,2
Yayılma (mm)	640	645	660	665
T500 (sn)	6,50	6,00	4,70	5,00

Çökme-yayılma deneyi sonuçları incelendiğinde, en yüksek yayılma değeri 660 mm ile %1 SRA katkılı KYB1 betonundan elde edilmiştir. En düşük yayılma değeri ise 640 mm ile kontrol KYB0 betonundan sağlandığı gözlenmiştir. %1 oranında SRA katkısı, yayılma çapını % 3,1 oranında artırırken, %0,8 ve %1,2 oranında SRA katkısının sırasıyla %1 ve % 4 civarlarında yayılma çapını arttırdığı görülmüştür. SRA katkısının taze beton özelliklerine olan etkisinin daha iyi anlaşılması için daha geniş dozaj aralığında çalışmalar yapılması gerektiğinin önemi anlaşılmıştır. SRA

katkısının, betonun eşik kayma gerilmesini etkilemesinin, çalışılan dozaj aralığına bağlı olarak fazla değişkenlik göstermediği belirlenmiştir.

KYB0, KYB0,8, KYB1, KYB1,2 numuneleri sırasıyla 640 mm, 645 mm, 660 mm ve 665 mm yayılma çapları ile TS 802 standardına göre SF2 sınıfına girmektedir. Tüm numunelerin KYB için verilen standart yayılma değerleri aralığında kaldığı görülmüştür. Karışımların hiçbirinde deney esnasında ayrışma gözlenmemiştir.

Yayılma çapı ile birlikte, KYB için önemli bir parametre olan T500 deney sonuçları incelendiğinde ise, 500 mm çapa en kısa sürede yayılan betonun KYB1 betonun, en uzun sürede yayılan betonun ise kontrol beton KYB0 betonu olduğu görülmektedir. KYB0, KYB0,8, KYB1 ve KYB1,2 betonun 500 mm çapa ulaşma süreleri sırasıyla 6,5 sn, 6 sn, 4,7 sn ve 5 sn olarak ölçülmüştür.

T500 süresi viskozite ile ilişkilendirildiğinden, çalışılan katkı oranları dahilinde tüm numunelerde, kontrol numuneye göre, SRA'nın akış hızını ve plastik viskoziteye çok az da olsa olumlu etkisi görülmektedir. %0,8, %1 ve %1,2 oranında SRA katkısı, kontrol betona göre sırasıyla %8, %38 ve %24 daha kısa sürede 500 mm çapa ulaşmasını sağlamıştır. Numunelerin T500 süreleri, 5-6,5 sn aralığında kalmış olup KYB kriterleri için öngörülen değerler arasında kalmıştır. T500 süreleri ile ilgili TS 802 standardında herhangi bir sınıflama yapılmamıştır. SRA'nın çalışılan katkı oranları dahilinde, numunelerin yayılma değerlerini ve T500 sürelerini fazla etkilemediği görülmektedir.

4.1.2. V hunisi deneyi sonuçları

Kendiliğinden yerleşme için başka bir kritik parametre olan akıcılık ve geçebilme yeteneğini ölçmek için yapılan, V hunisi deneyi sonuçları Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. V hunisi deneyi sonuçları

Deney	KYB0	KYB0,8	KYB1	KYB1,2
V hunisi (sn)	28,00	21,50	18,07	23,56

KYB0, KYB0,8, KYB1 ve KYB1,2 betonlarının V hunisi deney sonuçları sırasıyla 28,00 sn, 21,50 sn., 18,07 sn. ve 23,56 sn. olarak ölçülmüştür. V hunisi deneyi esnasında herhangi bir blokaj olayına rastlanmamıştır. En iyi akış süresi 18,07 sn ile %1 SRA katkılı KYB1 betonundan elde edilmiştir. KYB0,8, KYB1 ve KYB1,2 numunelerinin akış süreleri ≥ 7 sn, ≤ 27 sn aralığında kalmış olup TS 802 standardına göre VF2 sınıfına girerken, KYB0 numunesinin akış süresi bu sınıf aralığının dışında kalmıştır.

4.1.3. L kutusu deney sonuçları

KYB için geçebilme, ayrışma ve doldurma yeteneğini belirlemek için yapılan 3 donatılı L kutusu deneyi sonuçları Çizelge 4.3.'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. L kutusu deneyi sonuçları

Deney	KYB0	KYB0,8	KYB1	KYB1,2
L kutusu	0,837	0,840	0,875	0,850

KYB0, KYB0,8, KYB1 ve KYB1,2 numunelerinin h_2/h_1 geçiş oranları sırasıyla 0,837, 0,840, 0,875 ve 0,850 olarak ölçülmüş, bu değerlerin TS 802'de belirtilen 0,75 uygunluk kriteri oranını sağladığı görülmüştür. Tüm numunelerin 3 donatılı L kutusu

deneyi sonucunda, geçiş yeteneği oranları, $\geq 0,75$ oranından büyük olduğu için PA2 sınıfına girmektedir. L kutusu deney sonuçlarına göre en iyi geçebilme oranı 0,875 ile KYB1 betonundan elde edilmiştir. Diğer betonların geçiş yeteneğinde çok belirgin biçimde olmasada artışlar görülmüştür. Deney alışmaları esnasında donatılar arasından geçişte ve L kutusu haznesinde ilerlerken herhangi bir segregasyona rastlanmamıştır. SRA katkısının geçebilme yeteneği üzerinde ki etkileri, çalışılan dozaj aralığında incelendiğinde, çok fazla değişiklik göstermediği, çalışılan dozaj aralığının daha geniş tutularak daha iyi sonuçlar alınabileceği anlaşılmıştır.

4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Bu alışma kapsamında, basınç dayanım tayini, eğilme dayanımı tayini, schmidt çekici deneyi olarak gerçekleştirilen sertleşmiş beton deneylerinin sonuçları veriler ve grafikler eşliğinde incelenmiştir.

4.2.1. Basınç Dayanım Deneyleri

4.2.1.1. 2 günlük Basınç Dayanım Verileri

Sertleşmiş beton deneyi olarak çalışmanın başında, taze beton deneyleri sonuçları ile ilişkilendirerek, SRA'nın optimum dozajını bulmak için %0,8 , %1 ve %1,2 SRA katkılı KYB0,8, KYB1 ve KYB1,2 betonlarının her birinden 3'er adet numunenin ortalaması alınmak kaydıyla, 2 günlük basınç dayanım deneyleri yapılarak, basınç dayanım tayinleri yapılmıştır. Çizelge 4.4.'te verilen SRA katkılı numunelerin 2 günlük basınç deneyleri sonucunda, kontrol beton olarak tanımladığımız KYB0 betonun 2 günlük basınç dayanım değeri 36,53 MPa olarak ölçülmüştür. KYB0,8, KYB1 ve KYB1,2 betonlarının basınç dayanım değerleri sırasıyla 33,27 Mpa, 31,63 Mpa ve 31,23 Mpa olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. 2 günlük basınç deneyi sonuçları

Numune Yaşı (gün)	KYB0(ort) (Mpa)	KYB0,8(ort) (Mpa)	KYB1(ort) (Mpa)	KYB1,2(ort) (Mpa)
2	36,53	33,27	31,63	31,23

SRA katkı oranı %0,8 olan KYB0,8 betonunun 2 günlük basınç dayanımı, kontrol betonu olan KYB0 betonun 2 günlük basınç dayanımı ile kıyaslandığında %9 basınç dayanımı kaybı görülmüştür. Katkı oranı % 1 olan KYB1 betonun 2 günlük basınç dayanımında ise, kontrol beton olan KYB0'ın 2 günlük basınç dayanımına göre %13,5'lik bir dayanım kaybı oluşmuştur. %1,2 SRA katkılı numune olan KYB1,2'nin 2 günlük numunenin basınç dayanım kaybı kontrol beton KYB0'a göre %14,5 olarak görülmüş ve kontrol beton KYB0'a göre SRA dozajının artmasıyla beklenen basınç dayanım kaybı gerçekleşmiştir.

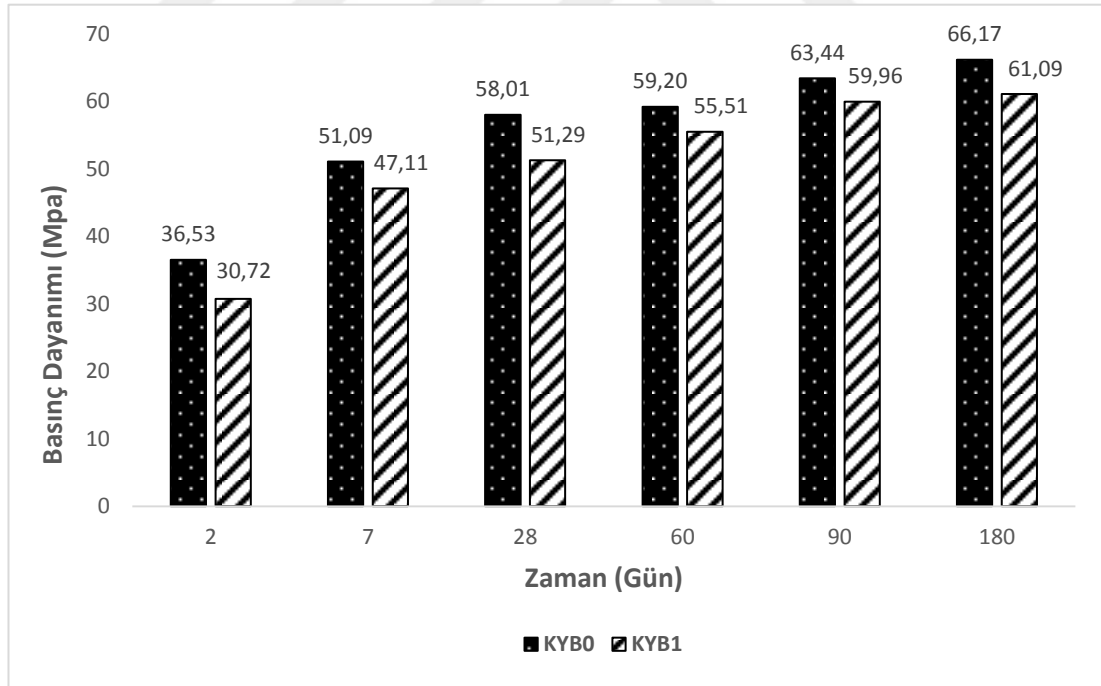
Sonuçları bir önceki bölümde verilen taze betonların deney özellikleri de göz önüne alındığında, %1 SRA katkısı ile hazırlanan KYB1 betonun daha optimum sonuçlar verdiği görülmüş ve KYB1 betonu ile deneysel çalışmalara devam edilerek SRA katkısının dayanım ve dayanıklılığa olan etkileri incelenmiştir.

4.2.1.2. Su Küründe Bekletilen Numunelerin Basınç Dayanım Verileri

Optimum dozaj belirlendikten sonra, numunelerinin mekaniksel özellikleri incelemek için ilk olarak laboratuvar koşullarında deney günlerine kadar su küründe bekletilen numunelerin basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Her bir yaş günü için üretilen 3'er adet numunenin sonuçlarının ortalaması alınmak kaydıyla, 2, 7, 28,60, 90 ve 180 günlük KYB0 ve KYB1 numunelerinin ortalama basınç dayanım sonuçları Çizelge 4.5. ve Şekil 4.1.'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Su küründe bekletilen numunelerin basınç deneyi sonuçları

Numune Yaşı (Gün)	KYB0(ort) (MPa)	KYB1(ort) (MPa)
2	36,53	30,72
7	51,09	47,11
28	58,01	51,29
60	59,20	55,51
90	63,44	59,96
180	66,17	61,09



Şekil 4.1. Su küründe bekletilen numunelerin basınç deney grafiği

Su küründe bekletilen 1. grup KYB0 ve KYB1 numunelerinin basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, her iki numunenin de kürlenme süresine bağlı olarak zaman içerisinde basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. Literatürde sertleşmiş betonlar için kritik gün olarak anılan 7. ve 28. günler kontrol alındığında, KYB0'ın 7 ve 28. gündeki basınç dayanım değerleri sırasıyla 51,09 MPa, 58,01 MPa, KYB1'in 7 ve 28. gündeki basınç dayanım değerleri ise sırasıyla 47,11 Mpa ve 51,29 Mpa olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar KYB'nin yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğu fikrini doğrulamıştır.

SRA katkısının basınç dayanımına etkileri incelendiğinde, 2, 7 ve 28. günlerde kontrol betona kıyasla sırasıyla yaklaşık %16, %8 ve %12'lik basınç dayanım kayıpları, 60., 90. ve 180. günlerde ise basınç dayanım kayıpları sırasıyla yaklaşık % 6,2 , %6 ve %7,6 olarak görülmüştür. SRA'nın özellikle erken yaş dayanım kayıpları üzerinde etkili olduğu, geç yaşlarda dayanım kayıplarının erken yaşlara kıyasla azalarak devam ettiği görülmüştür.

Bu dayanım kayıpları üzerinde SRA'nın hidrasyonu geciktirici etkisinin sebep olduğu düşünülmektedir. Yüzey gerilimini azaltmaya yardımcı olan, düşük viskoziteye sahip SRA moleküllerinin, çimento hamurlarının artan özgül yüzey alanının, katı yüzeylerle ilişkili su miktarlarını artıracak bililmektedir. Bu çimentonun hidrasyonu için mevcut olan su miktarını azaltarak, hidrasyon derecesini etkilemesi ve betondaki boşluklar üzerinde etkili olarak atomlar arası mesafeyi etkileyerek, betonda mekanik özellikleri azaltarak nihai dayanımı düşürdükleri düşünülmektedir.

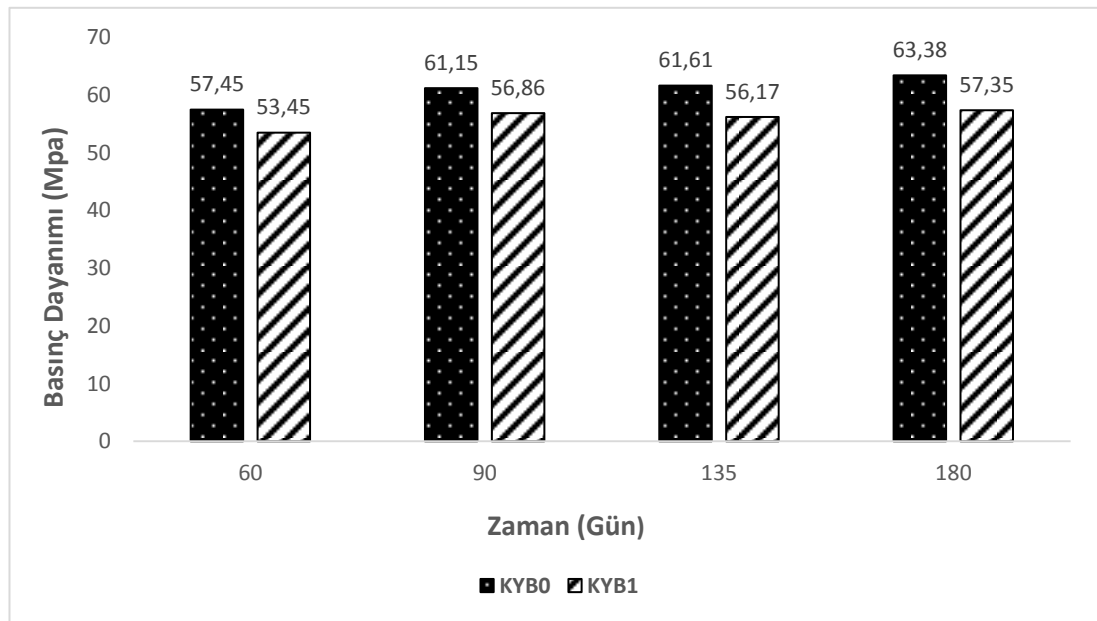
4.2.1.3. Na₂SO₄ Küründe IKÇ Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanım Verileri

Daha sonra 2. grup KYB0 ve KYB1 betonları ise belirli bir dayanım kazanmaları için ilk 28 gün normal su küründe bekletildikten sonra, 100 g/l olarak derişimi belirlenen , %10 oranında Na₂SO₄ içeren kürde, 3 gün ıslanma-3 gün kuruma, çevrimleri uygulanmıştır. Bu numunelerin her bir yaş günü için üretilen 3'er adet

numunenin sonuçlarının ortalaması alınmak kaydıyla 60, 90, 135 ve 180 günlük KYB0 ve KYB1 numunelerinin ortalama basınç dayanım sonuçları Çizelge 4.6. ve Şekil 4.2’de verilen grafiklerde gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 Na₂SO₄ küründe IKÇ uygulanan numunelerin basınç deneyi sonuçları

Numune Yaşı (gün)	KYB0(ort) (MPa)	KYB1(ort) (MPa)
60	57,45	53,45
90	61,15	56,86
135	61,61	56,17
180	63,38	57,35



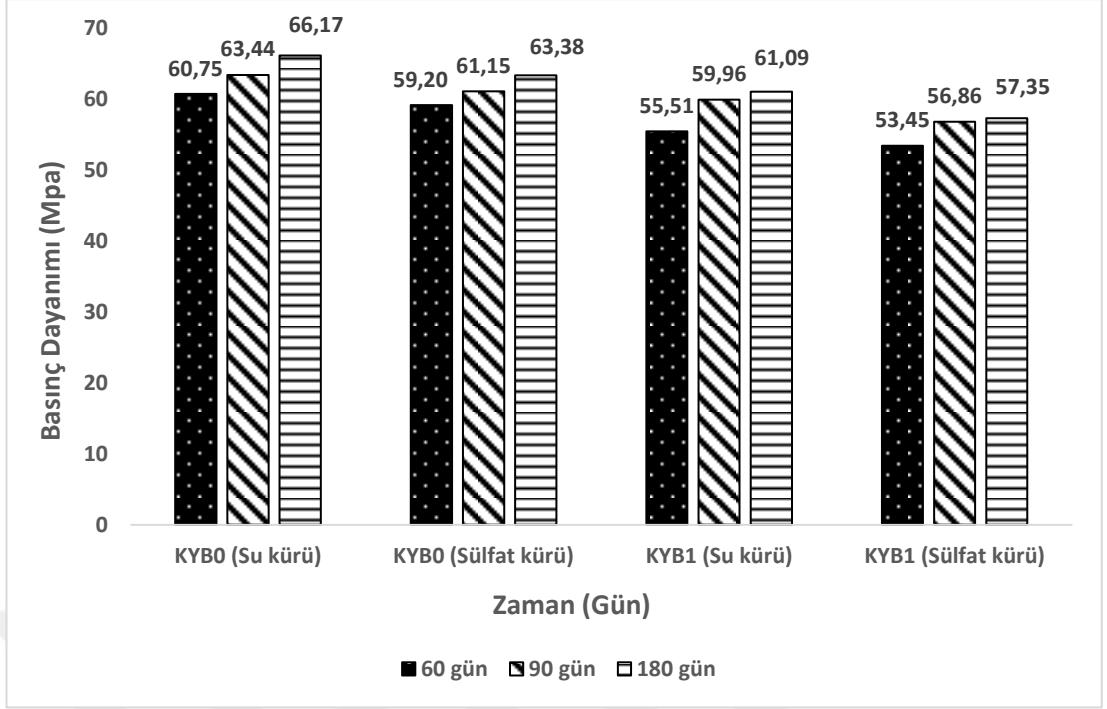
Şekil 4.2. Na₂SO₄ küründe IKÇ uygulanan numunelerin basınç deney grafikleri

%10 oranında Na_2SO_4 içeren kürde 3 gün kuruma, 3 gün ıslanma çevrimleri uygulanan numunelerin basınç dayanım sonuçları incelendiğinde her iki numunenin de zaman içerisinde basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. KYB0'ın 60 günlük basınç dayanım değeri 57,45 Mpa görülürken 90, 135 ve 180.günlerdeki basınç dayanım değerleri sırasıyla 61,15 Mpa, 61,61 Mpa ve 63,38 Mpa olduğu görülmüştür. KYB1'in 60 günlük basınç dayanım değeri 53,45 Mpa olarak görülürken 90, 135 ve 180.günlerdeki basınç dayanım değerleri sırasıyla 56,86 Mpa, 56,17 Mpa ve 57,35 Mpa olduğu görülmüştür.

SRA katkısı ile birlikte, sülfat etkisi ve İKÇ'nin kombin olarak basınç dayanımına etkileri incelendiğinde, 60, 90, 135 ve 180. günlerde sırasıyla yaklaşık %6,9, %7,1, %8,8 ve % 9,5'luk basınç dayanım kayıpları görülmüştür. SRA'nın dayanıma olan olumsuz etkisinin ilerleyen yaşlarda azalacağı bilinmesine rağmen, dayanım kayıplarının geç yaşlarda artarak devam ettiği görülmüştür. SRA'lı numunelerin, zaman içerisinde beton içine sızan sülfat tuzlarının İKÇ ile birlikte meydana getirdiği fiziksel ve kimyasal yıpratıcı etkiden daha fazla etkilendiği görülmüştür.

4.2.1.4. Karşılaştırmalı Basınç Deney Grafiklerinin Analizi

Su küründe bekletilen ve ilk 28 gün normal su küründe bekletildikten sonra, 100 g/l olarak derişimi belirlenen , %10 oranında Na_2SO_4 içeren kürde, 3 gün ıslanma-3 gün kuruma çevrimlerine tabi tutulan KYB0 ve KYB1 numunelerinin 60., 90. ve 180. günde basınç dayanım değerlerinin karşılaştırmalı grafiğı Şekil 4.3.'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Numunelerin karşılaştırmalı basınç dayanım grafiği

60 gün su küründe bekletilen KYB0 numunelerinin ortalama basınç dayanımı 60,75 Mpa iken, IKÇ'ye maruz bırakılan KYB0 numunelerinin ortalama basınç dayanımı 59,20 Mpa olarak belirlenmiştir. 90 gün su küründe bekletilen KYB0 numunesin ortalama basınç dayanımı 63,44 Mpa iken, IKÇ'ne maruz bırakılan KYB0 numunenin ortalama basınç dayanımı 61,15 Mpa olarak belirlenmiştir. 180. günde KYB0 için bu değerlerin sırasıyla 66,17 Mpa ve 63,38 Mpa olduğu görülmüştür. Sülfat çözeltisinde IKÇ'ye maruz bırakılan KYB0 numuneleri, su küründe ki KYB0 numunelerine kıyasla 60., 90. ve 180. günde sırasıyla yaklaşık %2,95, %3,60 ve % 4,2 basınç dayanımı kaybına uğramıştır.

60 gün su küründe bekletilen KYB1 numunelerinin ortalama basınç dayanımı 55,51 Mpa iken, IKÇ'ye maruz bırakılan KYB1 numunelerinin ortalama basınç dayanımı 53,45 Mpa olarak belirlenmiştir. 90 gün su küründe bekletilen KYB1 numunesin ortalama basınç dayanımı 59,96 Mpa iken, IKÇ'ye maruz bırakılan KYB1 numunenin ortalama basınç dayanımı 56,86 Mpa olarak belirlenmiştir. 180. günde KYB1 için bu değerlerin sırasıyla 61,09 Mpa ve 57,35 Mpa olduğu görülmüştür.

Sülfat çözeltisinde IKÇ'ye maruz bırakılan KYB1 numuneleri, su küründe ki KYB1 numunelerine kıyasla 60., 90. ve 180. günde sırasıyla yaklaşık %3,7 , %5,20 ve % 6,1 basınç dayanımı kaybına uğramıştır.

Sülfat çözeltisinde IKÇ çevrimlerine maruz kalmış her iki numunenin de su küründe bekletilen numunelere göre kıyasla sülfatın ve IKÇ'nin yıpratıcı etkisinden mukavemet olarak zarar gördüğü ve basınç dayanım kaybına uğradığı, çevrim sayısı arttıkça dayanım kayıplarının arttığı görülmüştür. Ayrıca çözelti konsantrasyonunun yüksek olmasının da bu kayıplar üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Dayanım kayıplarının zaman içerisinde artarak devam ettiği, SRA katkılı numunelerin sülfat etkisi ve IKÇ'lerinden kontrol numuneye göre daha fazla etkilendiği görülmüştür.

Sülfat etkisinin, IKÇ ile birlikte beton boşluklarının, ıslanma esnasında önce su ile birlikte sülfat iyonları ile dolacağı, kuruma esnasında bu suların buharlaşarak beton bünyesinden uzaklaşarak, sülfat iyonlarının boşlukta kaldığı düşünülmektedir. Bunun dayanım kayıpların artmasına neden olduğu, betonların geçirimsizliklerini etkilediği, betonların yıpranma hızını artırdığı ve mukavemetin düşmesine neden olduğu görülmüştür.

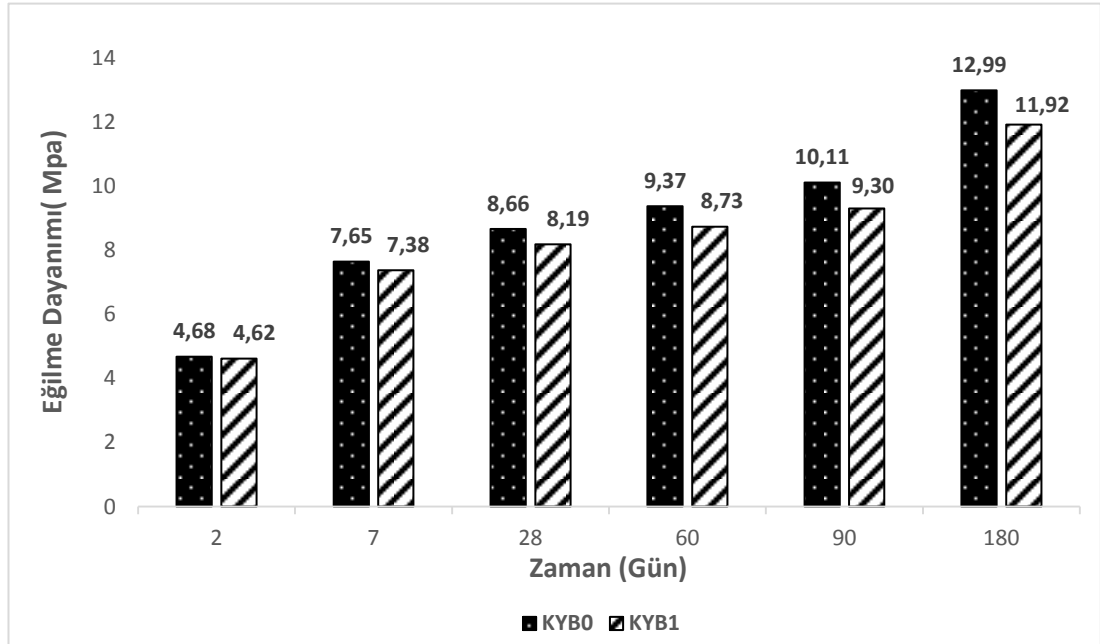
4.2.2. Eğilme Dayanım Deneyleri

4.2.2.1. Su Küründe Bekletilen Numunelerin Eğilme Dayanım Verileri

İlk olarak, deney gününe kadar su küründe bekletilen 1. grup numunelerin, 2, 7, 28, 60, 90 ve 180. deney günlerinin her biri için 3 adet kiriş numune üzerinde yapılmıştır. 3 noktalı eğilme deneyi sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmak kaydıyla, KYB0 ve KYB1 kiriş numunelerinin ortalama eğilme dayanım sonuçları Çizelge 4.7. ve Şekil 4.4'te verilen grafiklerde gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Su küründe bekletilen numunelerin eğilme deneyi sonuçları

Numune Yaşı (gün)	KYB0(ort) (MPa)	KYB1(ort) (MPa)
2	4,68	4,62
7	7,65	7,38
28	8,66	8,19
60	9,37	8,73
90	10,11	9,30
180	12,99	11,92



Şekil 4.4. Su küründe bekletilen numunelerin eğilme deney grafiği

Su küründe bekletilen 1.grup KYB0 ve KYB1 numunelerinin eğilme dayanım sonuçları incelendiğinde, kontrol numune olan KYB0 betonun 7 günlük eğilme dayanımı değeri 7,65Mpa'ın, 180 günlük eğilme dayanımı değeri 12,99 Mpa'ın yaklaşık %59'una karşılık gelmektedir. % 1 SRA katkılı KYB1'in 7 günlük eğilme dayanımı değeri 7,38 Mpa'ın ise, 180 günlük eğilme dayanımı değeri 11,92 Mpa'ın yaklaşık % 62'ine karşılık geldiği görülmektedir.

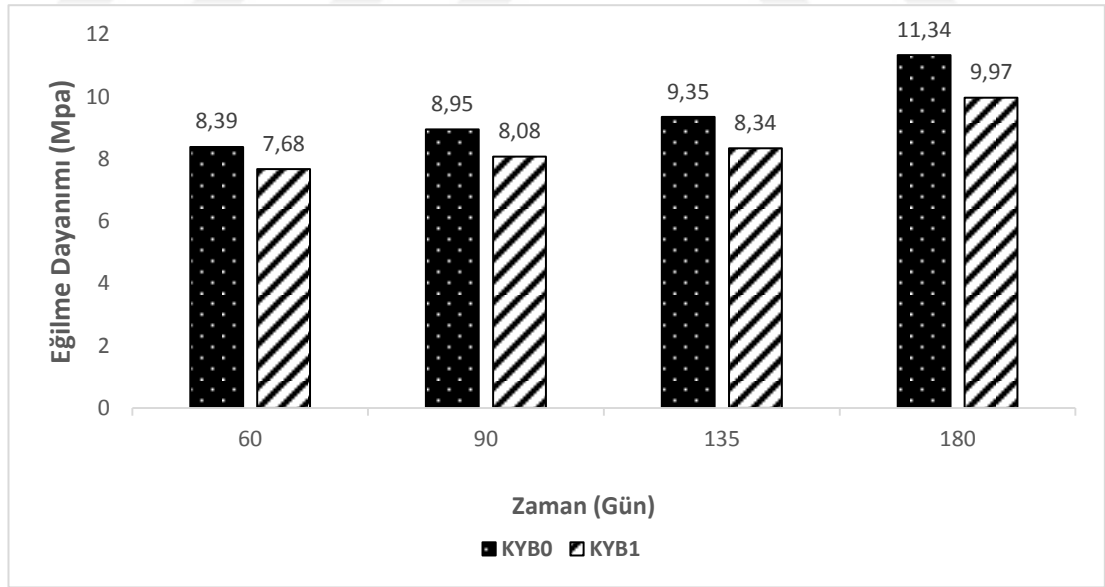
SRA katkısının eğilme dayanımına etkileri incelendiğinde 2, 7, 28,60, 90 ve 180. günlerde sırasıyla yaklaşık %1,30 , %3,50, %5,40 %6,80 , %8,00 ve %8,25 oranında dayanım kayıpları görülmüştür. En az dayanım kaybının 2 günlük numunelerde gerçekleştiği, geç yaşlarda görülen eğilme dayanım kaybının yüksek olduğu görülmüştür. İlerleyen yaşlarda bu kaybın artarak devam ettiği fakat artış hızında bir azalma olduğu görülmektedir.

4.2.2.2. Na₂SO₄ Küründe İslanma-Kuruma Çevrimine Maruz Bırakılan Numunelerin Eğilme Dayanımı Verileri

Daha sonra 2. grup KYB0 ve KYB1 kırı ş numuneleri ise belirli bir dayanım kazanmaları için ilk 28 gün normal su küründe bekletildikten sonra, 100 g/l olarak derişimi belirlenen , %10 oranında Na₂SO₄ içeren kürde, 3 gün ıslanma-3 gün kuruma çevrimleri uygulanmıştır. Bu numunelerin her bir yaş günü için üretilen 3'er adet kırı ş numunenin sonuçlarının ortalaması alınmak kaydıyla 60, 90, 135 ve 180 günlük KYB0 ve KYB1 numunelerinin ortalama eğilme dayanım sonuçları Çizelge 4.8. ve Şekil 4.5'te verilen grafiklerde gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Na₂SO₄ küründe IKÇ uygulanan numunelerin eğilme deneyi sonuçları

Numune Yaşı (gün)	KYB0(ort) (MPa)	KYB1(ort) (MPa)
60	8,39	7,68
90	8,95	8,08
135	9,35	8,34
180	11,34	9,97



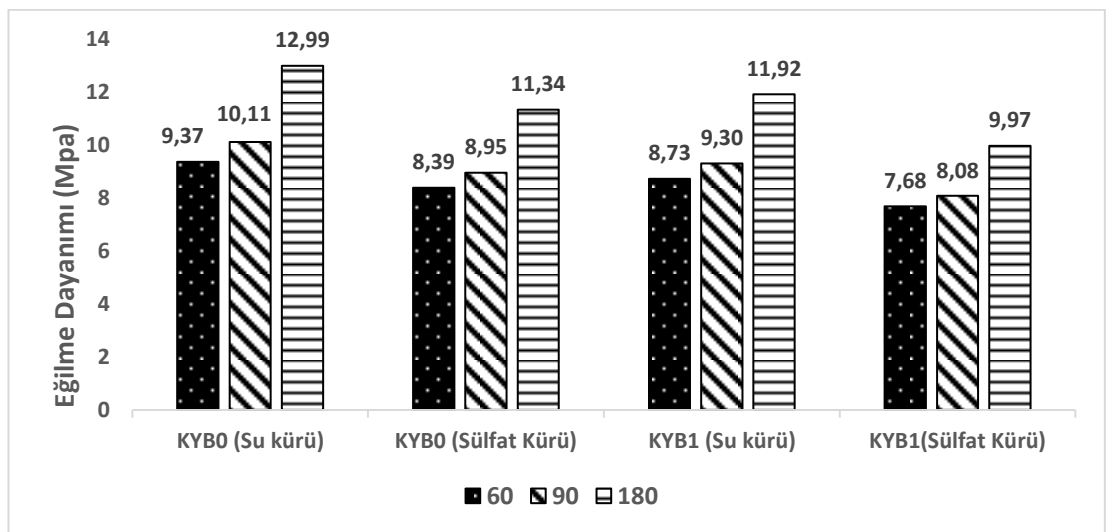
Şekil 4.5. Na₂SO₄ küründe IKÇ uygulanan numunelerin eğilme deneyi grafikleri

%10 oranında Na_2SO_4 içeren kürde 3 gün kuruma, 3 gün ıslanma çevrimleri uygulanan numunelerin basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, kontrol numune olan KYB0 betonun 60 günlük eğilme dayanımı değeri 8,39 Mpa'nın, 180 günlük eğilme dayanımı değeri 11,34 Mpa'nın yaklaşık %74'üne karşılık gelirken, % 1 SRA katkılı KYB1'in 60 günlük eğilme dayanımı değeri 7,68 Mpa'nın , 180 günlük eğilme dayanımı değeri 9,92 Mpa'nın yaklaşık % 77'ine karşılık gelmektedir.

SRA katkısının eğilme dayanımına etkileri incelendiğinde 60, 90, 135 ve 180. günlerde sırasıyla yaklaşık olarak %8,40 , %9,75 , %10,80 , %12,10 oranında dayanım kayıpları görülmüştür. Dayanım kayıplarının ilerleyen yaşlarda arttığı, SRA katkısının yanı sıra ıslanma-kuruma çevrimi ve sülfat etkisinin artan bu kayıplar üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

4.2.2.3. Karşılaştırmalı Eğilme Dayanımı Deney Grafiklerinin Analizi

Su küründe bekletilen ve ilk 28 gün normal su küründe bekletildikten sonra, 100 g/l olarak derişimi belirlenen , %10 oranında Na_2SO_4 içeren kürde, 3 gün ıslanma-3 gün kuruma çevrimlerine tabi tutulan KYB0 ve KYB1 numunelerinin 90. ve 180. gündeki eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.6.'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Numunelerin karşılaştırmalı eğilme dayanım grafiği

60 gün su küründe bekletilen KYB0 numunesin ortalama eğilme dayanımı 9,37 Mpa iken, IKÇ'ye maruz bırakılan KYB0 numunesinin 60. gündeki ortalama eğilme dayanımı 8,39 Mpa olarak belirlenmiştir. 90 gün su küründe bekletilen KYB0 numunesinin ortalama eğilme dayanımı 10,11 Mpa iken, IKÇ'ye maruz bırakılan KYB0 numunesinin 90. günündeki ortalama eğilme dayanımı 8,95 Mpa olarak belirlenmiştir. 180. günde KYB0 için bu değerlerin sırasıyla 12,99 Mpa ve 11,34 Mpa olduğu görülmüştür. Sülfat çözeltisinde IKÇ'ye maruz bırakılan KYB0 numuneleri, su küründe ki KYB0 numunelerine kıyasla 60., 90. ve 180. Günde sırasıyla % 10,5 % 11,4 ve % 12,7 eğilme dayanımı kaybına uğramıştır.

60 gün su küründe bekletilen KYB1 numunesin ortalama eğilme dayanımı 8,86 Mpa iken, IKÇ'ye maruz bırakılan KYB1 numunesinin 60. Gündeki ortalama eğilme dayanımı 7,52 Mpa olarak belirlenmiştir. 90 gün su küründe bekletilen KYB1 numunesin ortalama eğilme dayanımı 9,30 Mpa iken, ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunenin ortalama eğilme dayanımı 8,08 Mpa olarak belirlenmiştir. 180. günde KYB1 için bu değerlerin sırasıyla 11,92 Mpa ve 9,97 Mpa olduğu görülmüştür. Sülfat çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan KYB1 numunelerinin 60., 90. ve 180. günde sırasıyla yaklaşık %12,0 %13,1 ve % 16,3 eğilme dayanımı kaybına uğramıştır.

Her iki numunenin de sülfat çözeltisinde IKÇ çevrimleri sonucu eğilme dayanım kaybına uğradığı, çevrim sayısı arttıkça dayanım kayıplarının arttığı görülmüştür.

4.2.3. Schmidt Çekici Deney Verileri

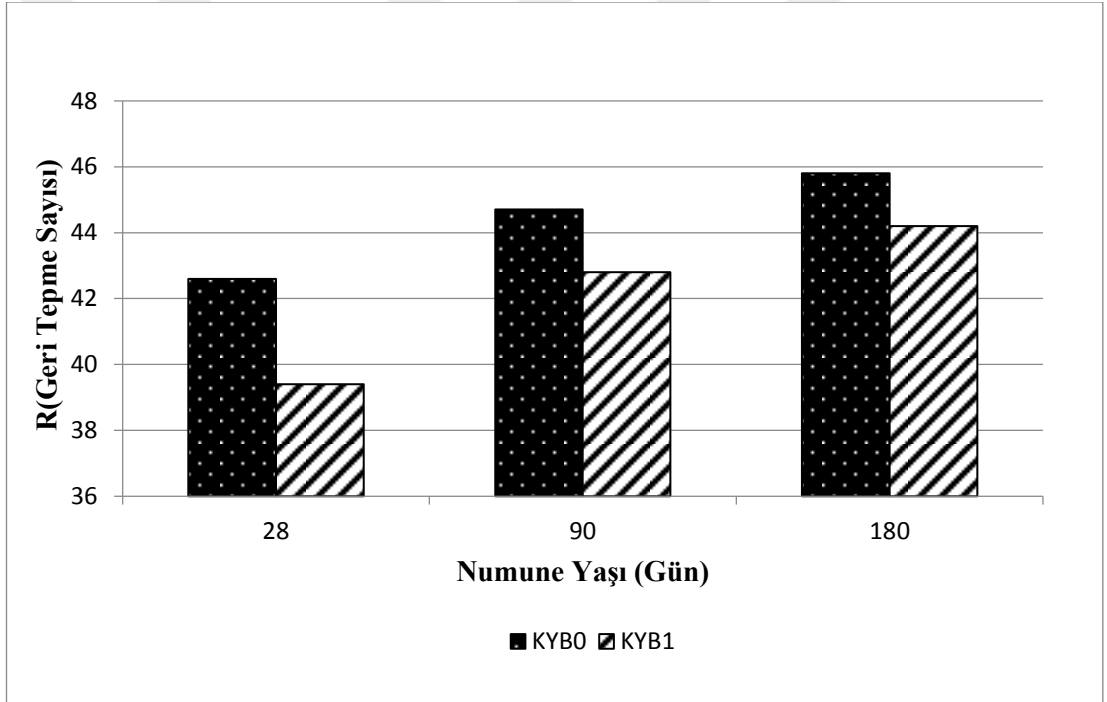
Su küründe bekletilen KYB0 ve KYB1 numunelerinin yüzey sertliği hakkında fikir edinmek için ve basınç dayanım tayini sonuçları arasında bir korelasyon kurmak için yapılan 28, 90 ve 180. günlerde yapılan schmidt çekici deneyi sonuçları Çizelge 4.9 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.9. Schmidt Çekici Deneyi R Okumaları

Vuruş Sayısı	KYB0	KYB1	KYB0	KYB1	KYB0	KYB1
	28	28	90	90	180	180
	R	R	R	R	R	R
1	42	39	44	42	45	44
2	43	40	45	43	46	43
3	43	39	45	43	46	45
4	42	40	44	44	46	43
5	42	40	45	43	45	43
6	43	39	45	43	46	45
7	42	39	45	42	46	45
8	43	39	45	42	46	44
9	43	39	44	43	46	45
10	43	40	45	43	46	45
Ort.	42,6	39,4	44,7	42,8	45,8	44,2

Karelajlar uygulanarak her numune için yapılan 10 vuruş sonucu, geri tepme okumalarının aritmetik ortalamaları alınmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında 28, 90 ve 180.günler için KYB0 numunesinde R değerleri sırasıyla 42,6 44,7 ve 45,8 olarak belirlenirken, KYB1 numunesinde R değerleri sırasıyla 39,4 42,8 ve 44,2 olarak belirlenmiştir. Basınç dayanım tayini sonuçları ile elde edilen ortalama basınç değerleri ile arasında bir uyum görülmüştür. KYB0 kontrol numunelerinin yüzey sertliğinin, KYB1 numunesine göre daha fazla olduğu, SRA katkısının dayanıma yaptığı olumsuz etki, yüzey sertliğinde de görülmüştür.

KYB0 numuneleri için 28, 90 ve 180. günlerde okunan R değerleri, aynı günlerde yapılan ortalama basınç dayanımı test sonuçları değerleri ile kıyaslandığında basınç dayanımlarının sırasıyla yaklaşık %73, %70 ve %69'una karşılık gelirken, KYB1 numuneleri için bu değerlerin sırasıyla yaklaşık %77, %71 ve %72 olduğu görülmüştür. Test çekicinin güvenilirlik katsayısının, beton yaşı ve karbonatlaşma ile alakalı olduğu bilinmektedir. Betonun erken yaşlarında yapılan deneyin bu korelasyonun elde edilmesinde önemli bir etken olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Schmidt çekici korelasyon tablosunda, R değerlerinin test çekicinin vuruş açısı ile değişebileceği ve basınç dayanımı ile arasındaki korelasyonu etkilediği sonucu da bu çalışmada ki R değerlerini etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Schmidt Çekici Deneyi Grafiği

4.3. Rötire Deneyi Sonuçları

SRA katkısının, değişik kür ortamlarında bekletilen KYB0 ve KYB1 numuneleri üzerinde meydana getirdiği boy değişimlerini, ölçmek için yapılan negatif rötire,

kuruma rötresi ve sodyum sülfat direnci altında ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerin rötre deneyleri sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.3.1. Negatif Rötre Deneyi Verileri

6 aylık bir süre zarfında devamlı olarak laboratuvar koşullarında su küründe bekletilen KYB0 ve KYB1 numunelerinin, belirli zaman aralıklarında yapılan ölçümlerle uğradıkları hacim değişiklikleri  izelge 4.10. ve bu sonuçlara bağlı olarak çizilen grafik  ekil 4.8’de ki grafiklerde verilmiştir.

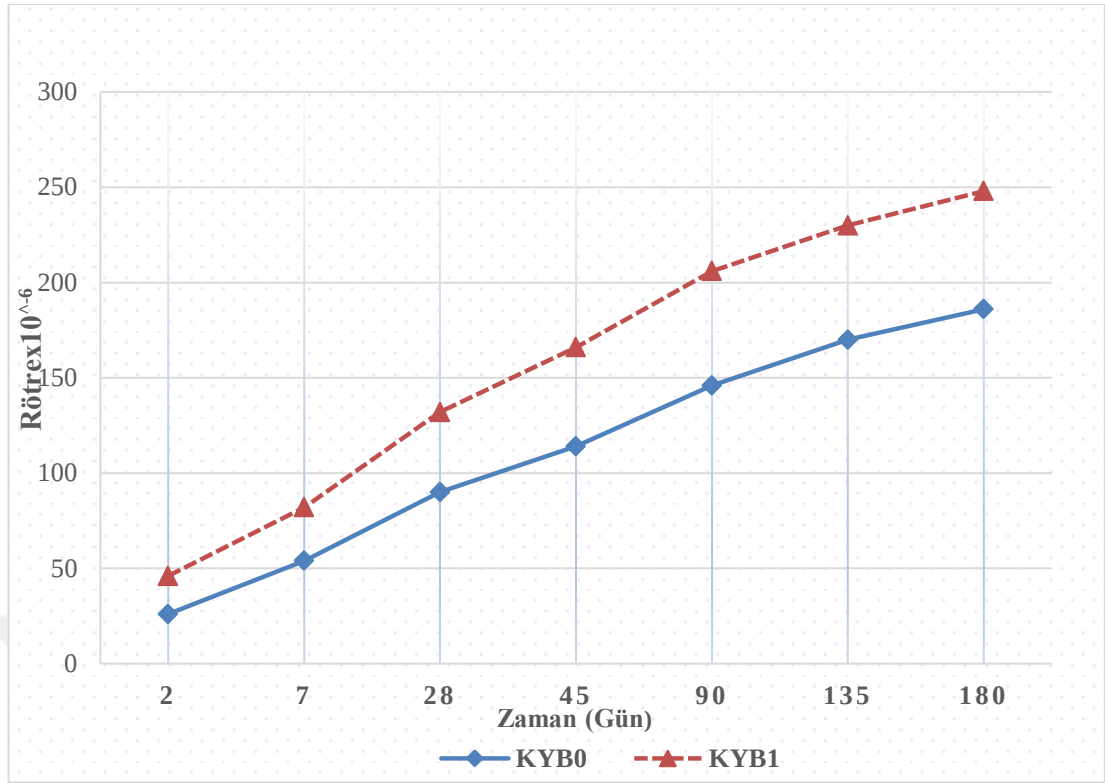
Çizelge 4.10. Negatif rötre deneyi sonuçları

Zaman (gün)	KYB0 ($\times 10^{-6}$)	KYB1 ($\times 10^{-6}$)
2	26	46
7	54	82
28	90	132
45	114	166
90	146	206
135	170	230
180	186	248

KYB0 ve KYB1 numunelerinin uzun bir süre su küründe muhafaza edilmeleri sonucu, her iki numunede negatif rötre veya  i me olarak adlandırdığımız hacim artışına u ramı lardır. KYB0 numunesi 2, 7, 28, 45, 90, 135 ve 180. günlerdeki boy artışıları sırasıyla 26, 54 , 90, 114 , 146 , 170, 186 $\times 10^{-6}$ olarak görülürken, SRA katkılı KYB1 numunesinin aynı günlerdeki boy artışıları sırasıyla 46, 82, 132, 166, 206, 230, 248 $\times 10^{-6}$ olarak g r lm  tir.

Kontrol numunelerde ki 28 günlük genleşme değeri, 180. günlük genleşmenin %48'ni oluştururken, SRA katkılı numunelerde bu oran %53 civarlarındadır. 2 günlük KYB1 numunesinin, kontrol numune KYB0'a göre %76 daha fazla genleştiği, 28 günlük KYB1 numunesinin KYB0 betonuna göre yaklaşık % 45 daha fazla genleştiği görülürken deney sonu olan 180. Günde bu oranın %33'lere kadar düştüğü gözlemlenmiştir. SRA katkılı numunelerin, kontrol betonlara göre daha fazla genleştiği, SRA'lı numunelerin genleşme hızının zaman geçtikçe azaldığı görülmüştür.

Sürekli kür ortamında tutularak iyileştirilen betonların hacimlerinde bir atış beklemek gerekir. Bu genleşme değerleri üzerinde numune içi nemin ve ortam neminin etkili olduğu düşünülmektedir. Kadioğlu (2006) ve Gettu (2002)'de [11,103] geleneksel betonda yaptığı çalışmalar sonucunda da SRA katkılı numunelerin su küründe beklemesi sonucu genleştikleri gözlenmiştir. Bunun kapiler boşlukların %100 bağıl nemin etkisi altında suyla dolmasına ve numunenin ve ortamın iç nemine, kullanılan SRA katkısının türüne bağlamışlardır. Ayrıca SRA olarak kullanılan bazı sürfaktanların, nemlendirici maddeler gibi davranması ve suyun betona nüfuz etmesi olasılığı yüksektir. Çalışmamızda elde edilen sonuçların bu sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. SRA katkısının, jel moleküllerinin kohezyonuna karşı koyan bir kuvvet olarak karşı bir basınç oluşturduğu, SRA'nın emilen su, C-S-H jelleri ve boşluklar üzerinde etkili olduğu, SRA'nın; numunelerin su içerisinde C-S-H jelleri tarafından emilen su nedeniyle absorbe su tabakasının kalınlaştırarak tanelerin birbirinden uzaklaşmasına yardımcı olduğu düşünülmektedir. Bunun sonucunda şişme ve hacim artışı nedeniyle genleşmeye neden olduğu sonucuna varılmıştır. Zaman içerisinde etkinliğini yitiren SRA nedeniyle, genleşme miktarlarının kontrol numuneye yaklaştığı görülmüştür.



Şekil 4.8. Negatif rötre deneyi grafiği

4.3.2. Kuruma Rötresi Deneyi Verileri

Özellikle yüzey gerilimini düşürerek kuruma rötresini önlemede etkili olduğu bilinen SRA katkısının etkilerini belirlemek için, laboratuvar koşullarında kurumaya maruz bırakılan KYB0 ve KYB1 numuneleri üzerinde gerçekleştirilen, kuruma rötresi deneyi sonuçları Çizelge 4.11 ve bu sonuçlara bağlı olarak çizilen grafik Şekil 4.9.'da verilmiştir.

Çizelge 4.11. Kuruma Rötresi Deney Sonuçları

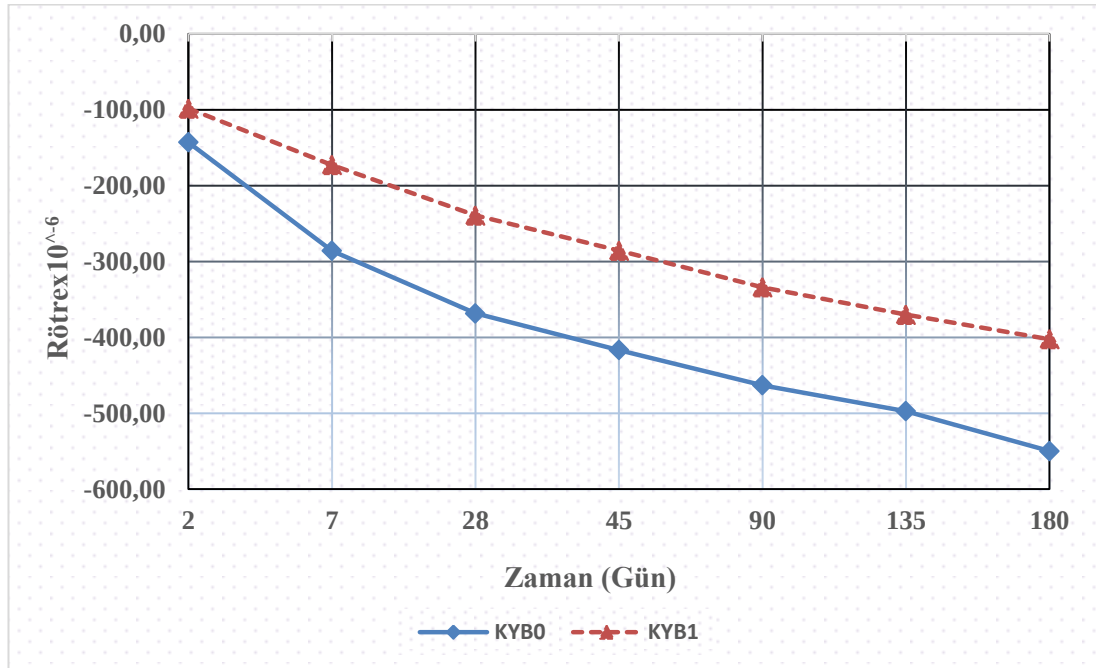
Zaman (gün)	KYB0 ($\times 10^{-6}$)	KYB1 ($\times 10^{-6}$)
2	142	98
7	285	173
28	368	239
45	416	285
90	463	334
135	497	370
180	549	402

Kuruma rötresi sonuçları incelendiğinde kontrol numune olan KYB0'ın, %1 SRA katkılı numune KYB1'e göre daha fazla rötreye yaptığı görülmektedir. KYB0 numunesi 2, 7, 28, 45, 90, 135 ve 180. günlerde gerçekleştirdiği büzülme değerleri sırasıyla yaklaşık 142, 285, 368, 416, 463, 497, 549 $\times 10^{-6}$ iken, KYB1 numunesi aynı günlerde sırasıyla yaklaşık 98, 173, 239, 285, 334, 370, 402 $\times 10^{-6}$ büzülme gerçekleştirmiştir. SRA katkılı numuneler, kontrol numuneye göre 2. günde yaklaşık % 31 daha az, 7. günde yaklaşık %40 daha az, 28. günde ise yaklaşık %35 daha az büzülmeye maruz kalmışlardır. Bu değerle 45, 90, 135. günlerde sırasıyla SRA katkılı numunelerin %32, %28, %25, %23 daha az büzülmesi ile sonuçlanırken deney sonu olarak belirlenen 180. günde yaklaşık % 27 daha az büzülme gerçekleşmiştir.

Büzülmenin on yıllar boyu gibi bir zaman sonra bile devam edileceği bilindiğinden, bu çalışmada deney sonu olarak 180. gündeki büzülme değerlerinin literatürde belirtilen nihai büzülmenin, ortalama yaklaşık %70-%80'ine karşılık geleceği düşünülmektedir.

Deney sonu olan 180. gündeki büzülme miktarı %100 kabul edilerek, büzülme değerleri arasında kıyaslama yapıldığında KYB0 numunesinin 2 günlük büzülme değeri, 180 günlük büzülmenin yaklaşık %25'ni karşılık gelirken bu değerler 7. ve 28. günler de sırasıyla yaklaşık %50 ve %67'ine karşılık gelmektedir.

KYB1 numunesinde ise 2, 7 ve 28. günlerdeki büzülme değerleri 180. gündeki büzülme değerinin sırasıyla %24,5, %43 ve %59'una karşılık geldiği gözlemlenmiştir. Literatürde SRA'ların büzülme üzerinde ki etkisi karışık bir mekanizma olarak belirtilmiştir. Gözenek çözeltisinde ki gerilmelerin, doğrudan yüzey gerilmeleri ile orantılı olması nedeniyle, SRA'ların yüzey gerilimini düşürerek kuruma rötresi azaltmada yardımcı olduğu genel kabul gören bir ifadedir [5]. Sonuçlar incelediğinde SRA katkısının numunelerin kuruma büzülmesi üzerinde etkili olduğu, özellikle betonun erken yaş dönemlerinde, kurutma büzülmesini azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür. İleri yaş dönemlerin de ise büzülme azaltmaya katkısının azalarak devam ettiği görülmüştür. Numunelerin 180.gün sonundaki rötire değerlerine baktığımızda SRA katkısının büzülmeyi geciktirici değil, nihai büzülmeyi azaltmada etkin olduğu görülmüştür.



Şekil 4.9. Kuruma Rötresi Deney Grafiği

4.3.3. İslanma-Kuruma ve Sülfat Direnci Deneyi Verileri

KYB0 ve KYB1 numunelerinin %10 Na₂SO₄ çözeltisi içinde sülfat direnci ve ıslanma-kuruma çevrimleri altında dayanıklılıklarını incelemek için yapılan boy değişim sonuçları Çizelge 4.12. ve bu sonuçlara bağlı olarak çizilen grafik Şekil 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.12. İslanma-Kuruma ve Sülfat Direnci Deneyi Sonuçları

Zaman (gün)	KYB0 (x10 ⁻⁶)	KYB1 (x10 ⁻⁶)
3	50	86
9	78	125
27	94	162
45	124	179
93	154	238
135	188	286
183	214	335

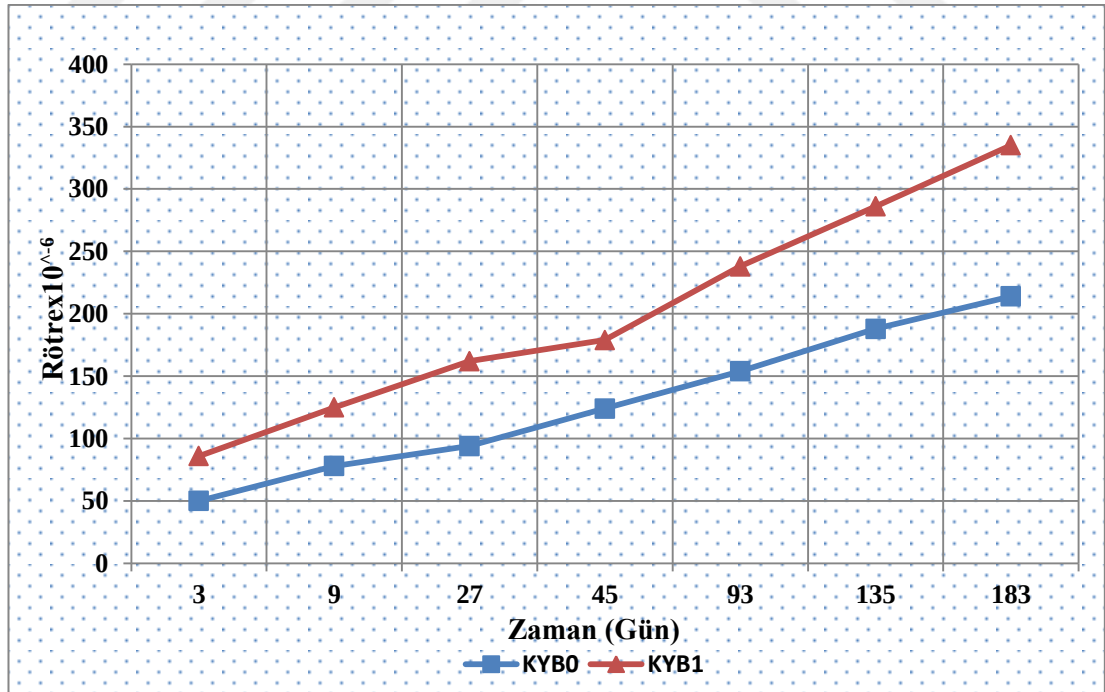
Sülfat çözeltisi içinde ıslanma-kuruma çevrimleri yapılan ve boy ölçümleri her ıslanma küründen sonra ölçülen numunelerin boy değişim incelendiğinde, KYB0 ve KYB1 numunelerinin her ikisinde deney sonucunda genleştikleri görülmüştür. Numunelerin boy değişim ölçümleri her seferinde boy değişim ölçümlerinin her seferinde ıslanma küründen çıkarıldıktan sonra yapılmıştır.

Kontrol numune olan KYB0 numunesinin 3, 9, 27, 45, 93, 135 ve 183. günlerde sırasıyla 50, 78, 94,124, 154, 188, 214 x 10⁻⁶ genleştikleri görülmüştür. %1 SRA

katkılı KYB1 numunesinin ise 3, 9, 27, 45, 93, 135 ve 183. günlerde sırasıyla 86, 125, 162, 179, 238, 286, 335 x 10⁻⁶ genleştikleri gözlemlenmiştir

SRA katkı numunelerin 27. gün sonunda kontrol numuneye göre %72 daha fazla genişirken bu oranın 183 gün sonundaki ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonra yaklaşık %56 daha fazla genleştiği görülmüştür Genleşme ve büzülmenin birlikte görüldüğü IKÇ çevrimlerinde, KYB1 numunesinde SRA katkısının kuruma çevrimi esnasında erken yaşlarda etkili olarak, daha az büzülmesine sebep olduğu, ıslanma esnasında ise boşluklar üzerinde etkili olan SRA sebebiyle daha fazla genleştiği ve nihai boy değişiminde, SRA katkı numunelerin kontrol numuneye kıyasla daha fazla genleştiği düşünülmektedir.

Bunun yanında ilerleyen yaş dönemlerinde genleşmenin, ıslanma-kuruma çevriminin şiddetine ve sıklığına bağlı olup, kuruma çevrimi esnasında kristalleşme, ıslanma çevrimi esnasında gerilmeler nedeniyle iç basınç ve şişme etkisiyle normal su küründe ki IKÇ'lerinden farklı olarak genleşmeye katkı sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 4.10 Sülfat küründe IKÇ sonucu boy değişim grafiği

4.3.4. Kısıtlanmış Rötire Deneyi Verileri

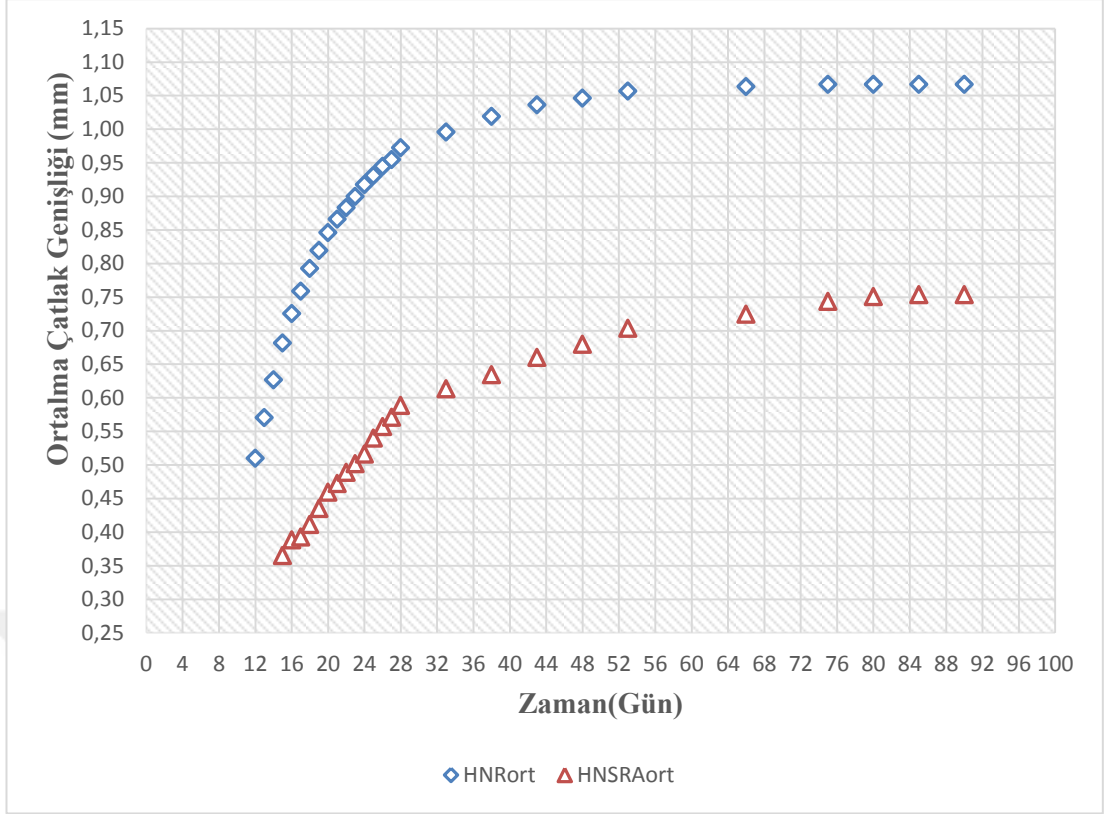
KYB0 ve KYB1 betonlarından elde edilen halka numuneler üzerinde gerçekleştirilen kısıtlanmış rötire deneyleri sonuçları Çizelge 4.13'te ve numunelerin ortalama çatlak genişliklerinin zaman içerisinde ki gelişimi Şekil 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Kısıtlanmış Rötire Deneyi Sonuçları

Çatlak Ölçüm Gün	HNR1 mm	HNR2 mm	ORT mm	HNSRA1 mm	HNSRA2 mm	ORT mm
12	0,54	0,48	0,51	0,00	0,00	0,00
13	0,65	0,55	0,57	0,00	0,00	0,00
14	0,72	0,60	0,63	0,00	0,00	0,00
15	0,77	0,64	0,68	0,41	0,32	0,37
16	0,81	0,67	0,73	0,43	0,35	0,39
17	0,85	0,70	0,76	0,45	0,37	0,39
18	0,88	0,74	0,79	0,47	0,37	0,41
19	0,91	0,77	0,82	0,49	0,40	0,43
20	0,94	0,80	0,85	0,52	0,43	0,46
21	0,96	0,82	0,87	0,53	0,44	0,47
22	0,98	0,83	0,88	0,55	0,46	0,49
23	1,00	0,84	0,90	0,56	0,47	0,50
24	1,01	0,85	0,92	0,58	0,48	0,52
25	1,02	0,86	0,93	0,61	0,50	0,54
26	1,03	0,86	0,94	0,63	0,52	0,56
27	1,04	0,87	0,95	0,65	0,52	0,57
28	1,05	0,88	0,97	0,66	0,54	0,59
33	1,08	0,90	1,00	0,69	0,56	0,61
38	1,11	0,92	1,02	0,71	0,58	0,63
43	1,13	0,93	1,04	0,73	0,62	0,66
48	1,14	0,94	1,05	0,75	0,63	0,68
53	1,15	0,95	1,06	0,77	0,65	0,70
66	1,16	0,95	1,06	0,78	0,66	0,72
75	1,17	0,95	1,07	0,80	0,67	0,74
80	1,17	0,95	1,07	0,80	0,68	0,75
85	1,17	0,95	1,07	0,80	0,68	0,75
90	1,17	0,95	1,07	0,80	0,68	0,75
HNR: Kontrol halka numune			HNSRA: % 1 SRA katkılı halka numune			

Kısıtlanmış rötre sonuçları incelendiğinde, kontrol beton olan KYB0 ile üretilen kontrol halka numunelerden HN1R ve HN2R numunelerinde ilk çatlak oluşumu 12. günde ve genişlikleri sırasıyla 0,54 mm ve 0,48 mm olarak ölçülmüştür. Kontrol halka numunelerde çatlak genişlikleri 90. gün sonunda sırasıyla 1,17 mm ve 0,95 mm ölçülmüştür. %1 SRA katkılı olan KYB1 betonu ile üretilen halka numunelerden HN1SRA ve HN2SRA numunelerinde ilk çatlak oluşumu 15. günde ve genişlikleri sırasıyla 0,41 ve 0,32 mm olarak ölçülmüştür. SRA katkılı halka numunelerde çatlak genişlikleri 90. gün sonunda sırasıyla 0,80 mm ve 0,68 mm ölçülmüştür. %1 oranında SRA katkısı, ilk günde oluşan çatlak genişliklerini kontrol betona göre HN1 ve HN2 numunelerinde sırasıyla %24 ve %33 oranında azaltmıştır.

Çatlak gelişimleri incelemek için, numunelerde çatlaklar oluşuktan 3 gün sonra çatlak genişlikleri incelendiğinde SRA katkısı sırasıyla HN1SRA ve HN2SRA numunelerinde çatlak genişliğini kontrol halka numunelere kıyasla yaklaşık % 37 ve %39 oranında azalttığı belirlenmiştir. 10 gün sonunda sırasıyla %38 ve %41 azalttığı, 90. Gün sonunda ölçülen son çatlak genişlikleri incelendiğinde ise SRA katkısının çatlak genişliklerini sırasıyla %32 ve % 29 oranında azalttığı görülmüştür. SRA katkısının çatlak genişliklerini ve gelişimine katkıda bulunduğunu, çatlak yaşını geciktirdiği, erken yaşlarda çatlak genişliği gelişimine katkısı daha fazla olan SRA'nın, geç yaşlarda katkısının azalarak devam ettiği görülmüştür.



Şekil 4.11. Kısıtlanmış rötre çatlak genişliğinin zamana bağlı gelişimi

4.4. Kılcal Su Emme Deneyi Verileri

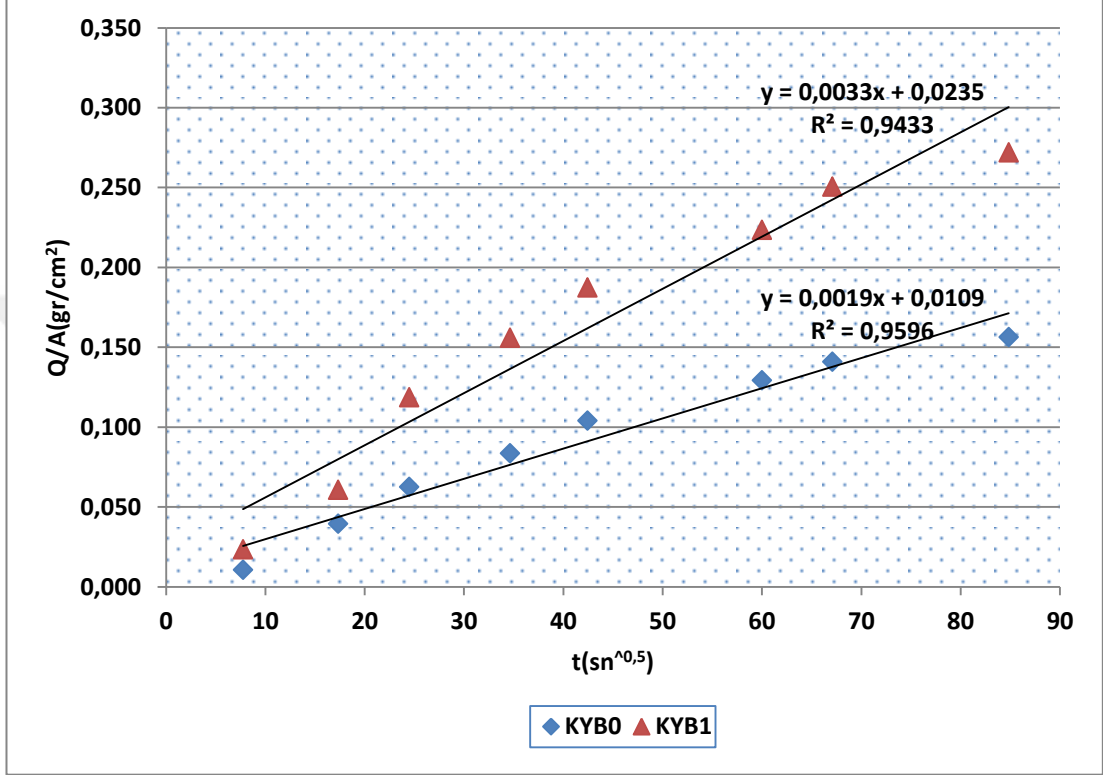
105 C°de 24 saat bekletilerek etüv kurusu haline getirilen 150x150x150 mm küp şeklindeki 90 günlük KYB0 ve KYB1 numunelerinde yapılan, betonların durabilitesi hakkında fikir veren, kapiler su emme deneyi sonuçları Çizelge 4.14'te verilmiştir. Şekil 4.12'de ise düşeyde, numunenin zamana bağlı olarak birim alandan emdikleri kümülatif su miktarları Q/A 'nın, yatayda ise zamanın kareköküne bağlı değişiminin grafiği verilmiştir.

Çizelge 4.14. Kılcallık Deneyi Sonuçları

t	$\sqrt{t}$	KYB0	KYB1	Q_{KYB0}	Q_{KYB1}	A	$\frac{Q_{KYB0}}{A}$	$\frac{Q_{KYB1}}{A}$
sn	sn	g	g	g	g	cm ²	g/cm ²	g/cm ²
0	0	7740,5	7556,2	0	0	225	0	0
60	7,75	7742,9	7561,5	2,4	5,3	225	0,011	0,024
300	17,32	7749,4	7569,9	8,9	13,7	225	0,040	0,061
600	24,49	7754,6	7582,9	14,1	26,7	225	0,063	0,119
1200	34,64	7759,3	7591,3	18,8	35,1	225	0,084	0,156
1800	42,43	7763,9	7598,4	23,4	42,2	225	0,104	0,188
3600	60,00	7767,6	7606,5	27,1	50,3	225	0,120	0,224
4500	67,08	7772,2	7612,6	31,7	56,4	225	0,141	0,251
7200	84,85	7775,7	7617,4	35,2	61,2	225	0,156	0,272

KYB1 numunesinin 1. dakika sonunda birim alandan kılcal olarak emdiği su 5,3 g iken, KYB0 numunesinin kılcal olarak emdiği su 2,4 g olarak görülmüştür. KYB1 numunesi 1. dakika sonunda, KYB0 numunesine göre yaklaşık 2,2 kat daha fazla su emmiştir. 2 saat süre sonunda ise, KYB1 numunesinin aynı alandan KYB0 numunesine göre yaklaşık 1,74 kat daha fazla kapiler olarak su emdiği görülmüştür. Her iki numuneninde zaman geçtikçe, birim alandan emdikleri su miktarları azalmıştır. SRA katkısının, numunelerin boşluk yapısı ve kılcal boşluklar üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

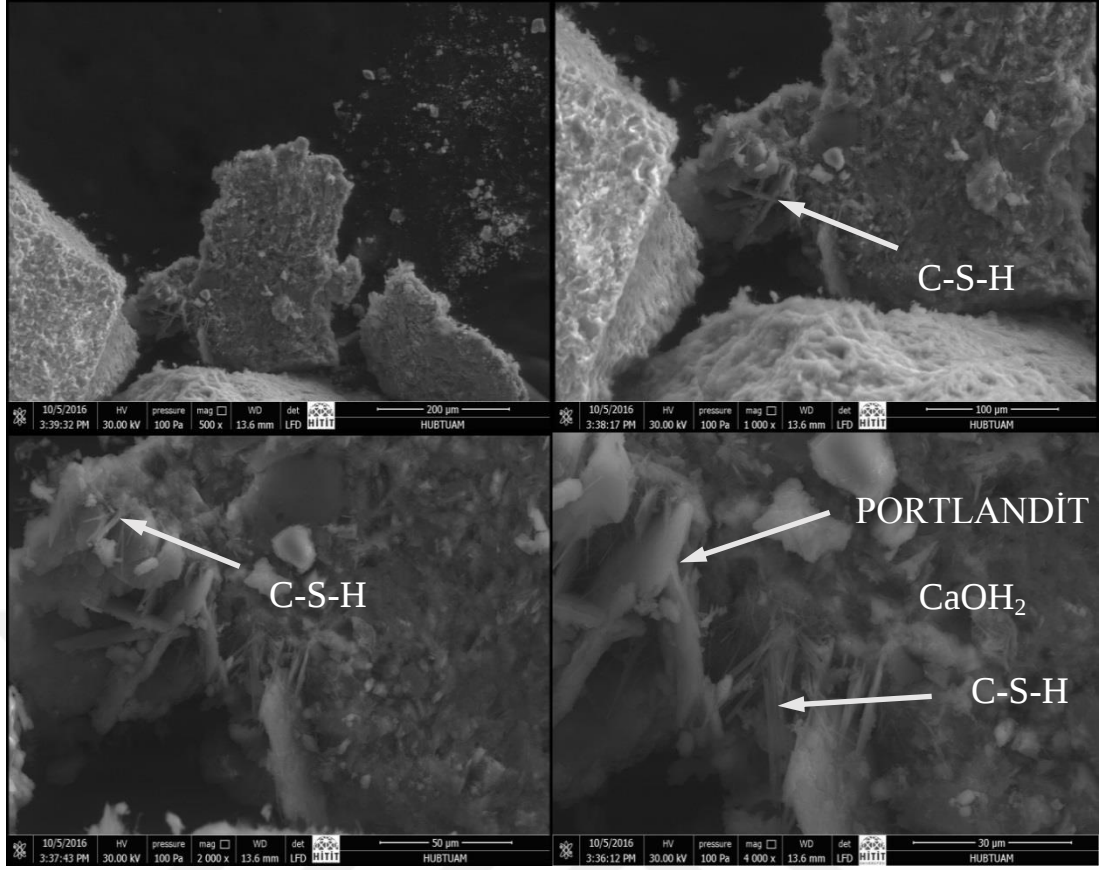
Şeil 4.12’de grafikte görüleceği üzere Q/A ile zaman arasında dağılımsal olarak çizilen grafikten çıkarılan eğilim çizgisi incelendiğinde, KYB1 numunesi için $y = 0,0033x + 0,00235$ doğrusu ve $R^2 = 0,9433$, KYB0 numunesi için ise $y = 0,0019x + 0,0109$ ve $R^2 = 0,9596$ değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Kılcallık deneyi grafiği

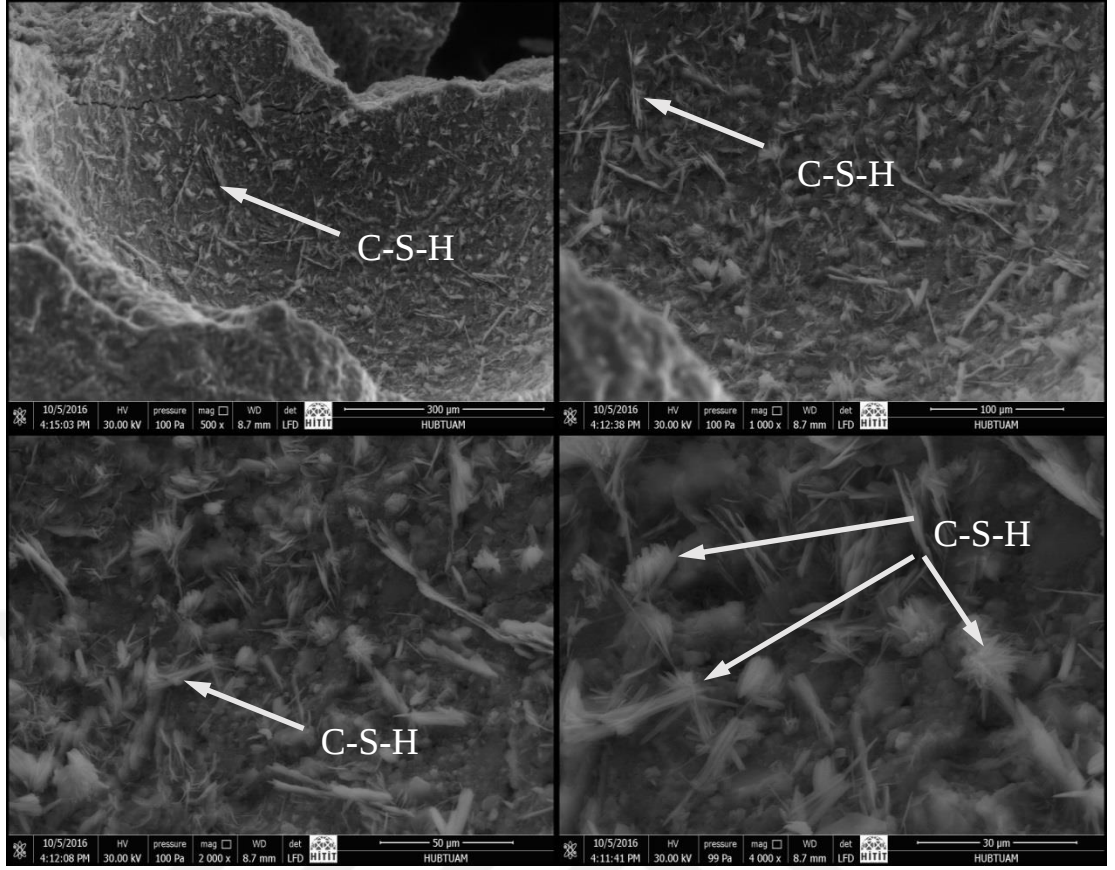
4.5. Mikroyapı Analizi Sonuçları

Su ve Na₂SO₄ kürlünde bekletilen 135 günlük KYB0 ve KYB1 numunelerinin taramalı elektron mikroskopunda elde edilen görüntüleri üzerinde mikro yapı analizleri yapılmıştır.



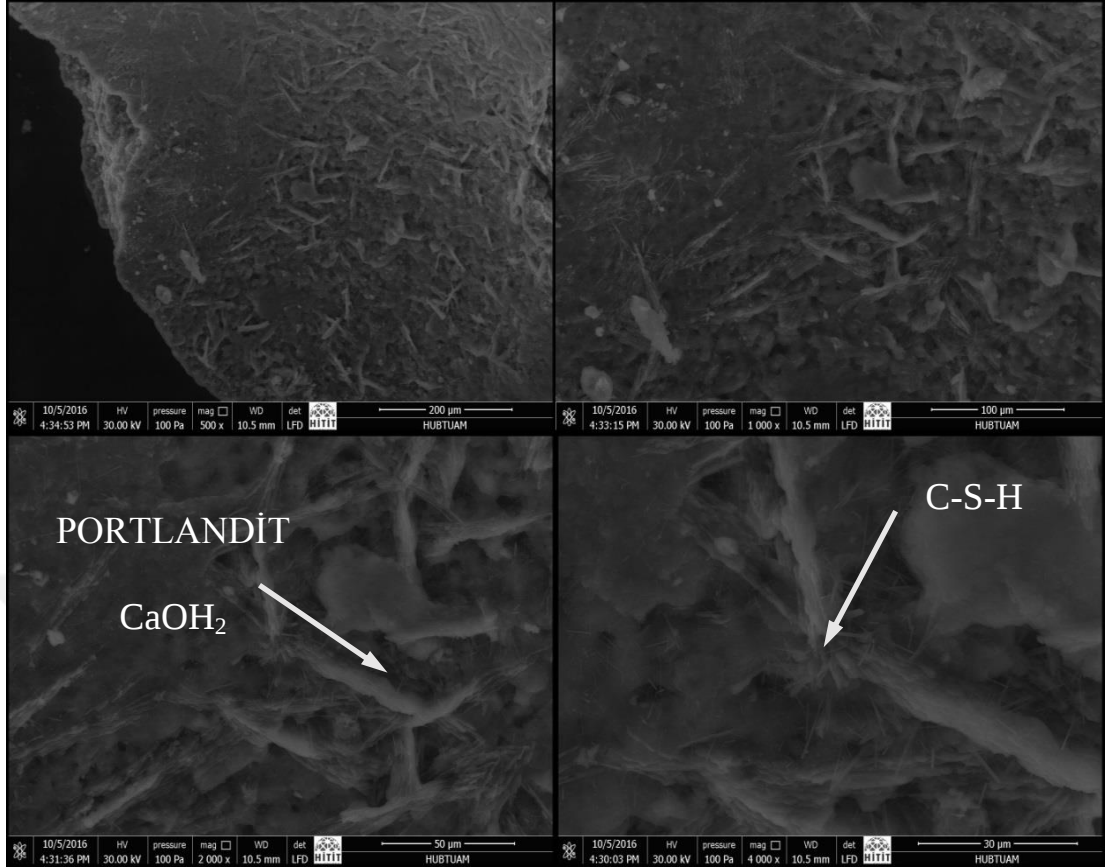
Şekil 4.13. Su küründe bekletilen KYB0 numunesine ait SEM görüntüleri, a. 500x büyütme b. 1000X büyütme c. 2000X büyütme d. 4000x büyütme

Şekil 4.13’de verilen 135 gün su küründe olgunlaştırılan numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, (a) görüntüsünde büyütme oranının fazla olmamasından kaynaklı yararlı ve zararlı oluşumlar görülememiştir. (b) görüntüsünde C-S-H jellerinin yoğun olduğu ve bu oluşumların da basınç dayanımlarındaki artış ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca (c) ve (d) görüntülerinde ise C-S-H jellerinin yanı sıra portlandit oluşumu net bir şekilde görülmektedir.



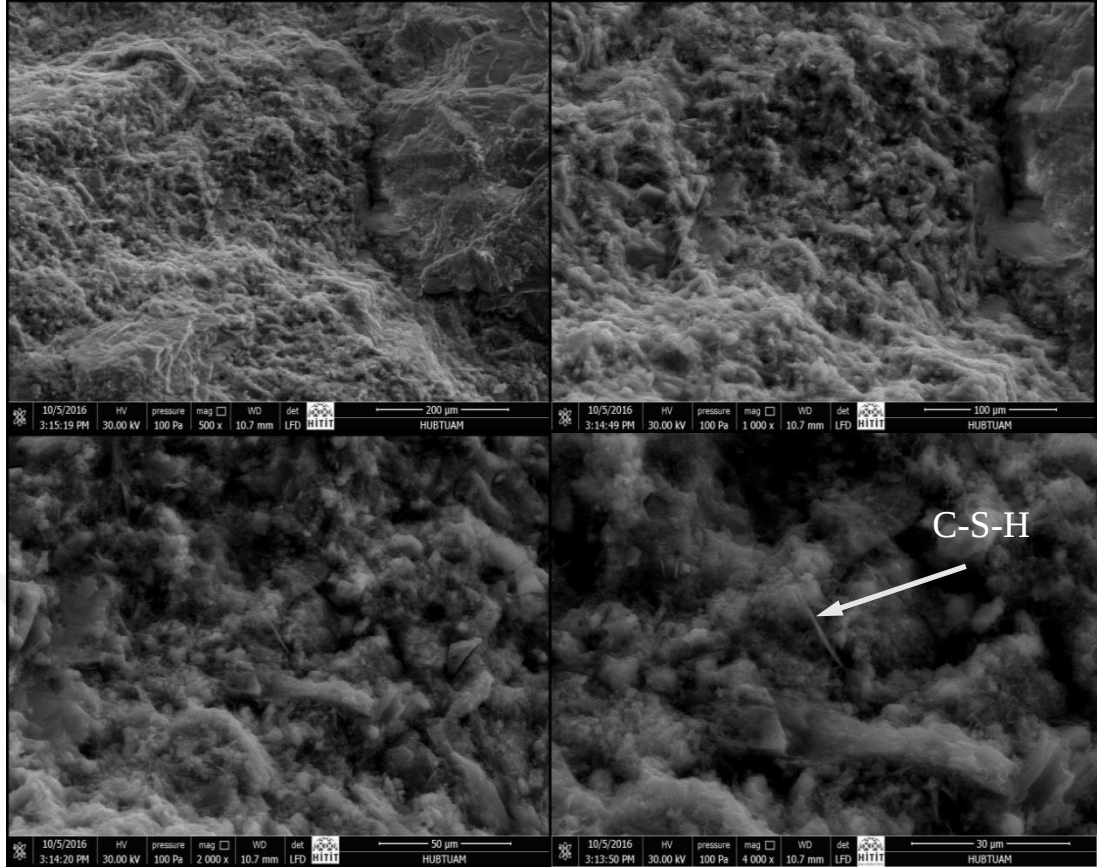
Şekil 4.14. Su küründe bekletilen KYB1 numunesine ait SEM görüntüleri, a. 500x büyütme b. 1000X büyütme c. 2000X büyütme d. 4000x büyütme

Şekil 4.14’te verilen 135 gün su küründe olgunlaştırılan numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, (a), (b), (c) ve (d) görüntülerinde C-S-H jellerinin yoğun olduğu ve bu jellerin tüm boşlukları doldurduğu bunun da dayanım artışına sebep olduğu görülmektedir. Ayrıca (a) 500x, (b) 1000x büyütmede dahi C-S-H jellerinin görülebilmesi çok yoğun bir jel oluşumuna işaret etmektedir.



Şekil 4.15. Na₂SO₄ küründe IKÇ uygulanan KYB0 numunesine ait SEM görüntüleri, a. 500x büyütme b. 1000X büyütme c. 2000X büyütme d. 4000x büyütme

Şekil 4.15'te verilen sodyum sülfat çözeltisinde ıslanma-kurumaya maruz kalmış numunelerin 135 gün yaşında ki SEM görüntüleri incelendiğinde, (a), (b) görüntülerinde büyütme oranının fazla olmamasından kaynaklı yararlı ve zararlı oluşumlar görülememiştir. (c) görüntüsünde portlandit oluşumu yoğun olduğu görülmektedir. (d) görüntüsünde ise portlandit oluşumunu yanı sıra C-S-H oluşumlarına rastlanmıştır. Bunun da dayanım artışına sebep olduğu görülmektedir

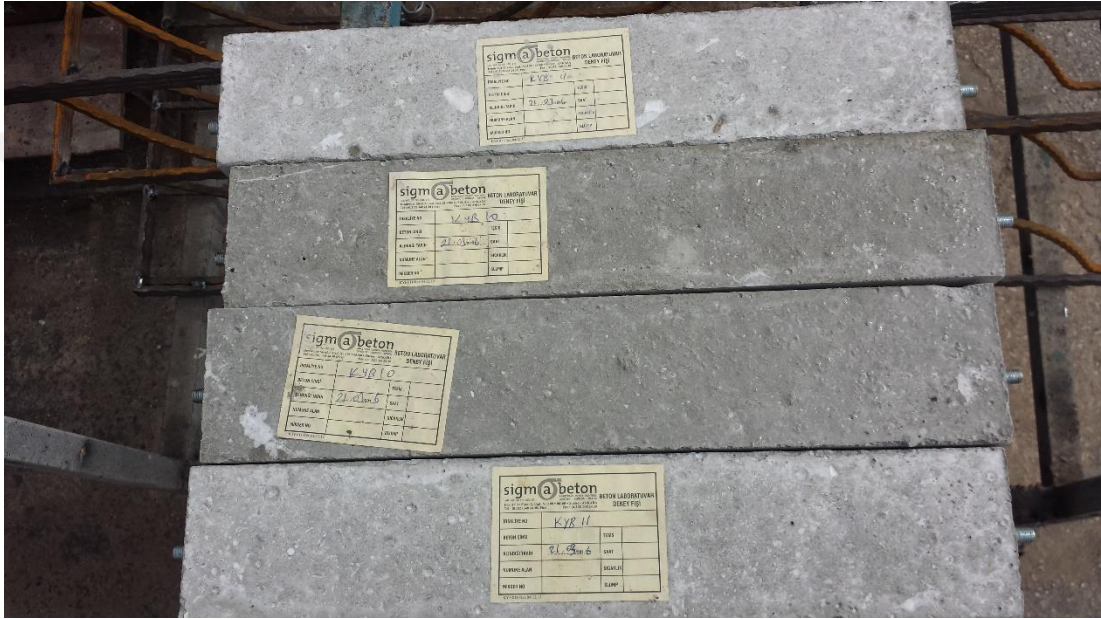


Şekil 4.16. Na₂SO₄ küründe IKÇ uygulanan KYB1 numunesine ait SEM görüntüleri
a. 500x büyütme b. 1000X büyütme c. 2000X büyütme d. 4000x büyütme

Şekil 4.16’da verilen sodyum sülfat çözeltisinde ıslanma-kurumaya maruz bırakılan numunelerin 135 gün yaşında ki SEM görüntüleri incelendiğinde, (a) ve (b) görüntülerinde büyütme oranının fazla olmamasından kaynaklı yararlı ve zararlı oluşumlar görülememiştir. (c) ve (d) görüntülerinde C-S-H jellerinin oluşumuna rastlanmış olup, bunun basınç dayanımlarındaki artış ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.

4.6. Fiziksel Değişimlerin Gözlenmesi

Kontrol numune KYB0 ve SRA katkılı KYB1 kiriş numuneleri 24 saat sonra kalıptan çıkarıldıktan sonra çekilen fotoğraflar Şekil 4.17’de verilmiştir. Fotoğraflar incelediğinde, SRA katkılı numunelerin, kontrol betona kıyasla daha koyu bir yüzey rengine sahip oldukları görülmüştür. İlerleyen yaş dönemlerinde bu yüzey rengi farkının kapandığı ve birbirine benzer yüzey rengine sahip oldukları görülmüştür.



Şekil 4.17. Kalıptan çıkarılan KYB0 ve KYB1 numunelerinin 1 günlük görüntüleri

Şekil 4.18 ‘de 90 gün IKÇ sonunda kuruma esnasında görüntülenen %1 SRA katkılı numunelerde görüldüğü gibi, sülfat çözeltisinde IKÇ’lerine maruz kalan numunenin yüzeylerinde beyazlaşmalar, kenarlarından ve köşelerinde hasarlar başlamadığı görülmüştür.



Şekil 4.18. IKÇ çevrimine maruz kalmış numune

Şekil 4.19’da ise 180 gün IKÇ’ne maruz bırakılmış numuneler kürden çıkarıldıktan sonra görüntülenen numunelere baktığımızda betonun yüzeyinde dökülmeler başlamıştır. Kristalleşmiş sülfat iyonlarının beton yüzeyine yapıştığı, IKÇ arttıkça hasar oranının arttığı görülmüştür. Sol tarafta bulunan %1 SRA katkılı KYB1 numunesinin yüzeyinde ki dökülmeler ve hasar oranının, kontrol KYB0 betonundan daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 4.19. 180 gün sülfat çözeltisinde IKÇ’ne maruz bırakılan numuneler

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan çalışmada %1 oranında SRA (Rötre Azaltıcı Katkı) kullanılarak üretilen KYB ve kontrol KYB numuneleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

KYB numuneleri üzerinde gerçekleştirilen taze beton deneyleri sonuçları incelendiğinde, tüm numunelerin Çökme yayılma, T 500, L kutusu ve V hunisi deneylerinden elde edilen değerler, KYB için standartlarda belirtilen genel kriterleri sağladığı görülmüştür. %0,8-%1,2 dozaj aralığında yapılan çalışmalar sonucunda, SRA katkısının, betonların yüzey gerilimini düşürmesi sebebiyle, taze beton özelliklerini çok belirgin biçimde olmasa da etkilediği görülmüştür. Optimum dozajı belirlemenin önemli olduğu, hedeflenen KYB için ön dökümlerle deneme yapılmasının önemi anlaşılmıştır.

Su küründe bekletilen KYB0'ın (kontrol KYB) 28. günde 58,01 Mpa, KYB1'in (%1 SRA katkılı) 28. günde 51,29 Mpa basınç dayanımlarına ulaşması KYB'ların yüksek dayanımlı beton sınıfında değerlendirilmesi gerektiği tezini doğrulamıştır.

Su küründe bekletilen ve Na_2SO_4 içeren kürde, ıslanma-kuruma çevrimlerine (İKÇ) tabi tutulan KYB0 ve KYB1 numunelerinin basınç ve eğilme deneyleri sonucunda, % 1 SRA katkılı KYB1 numunelerinde kontrol numune KYB0'a göre basınç ve eğilme dayanımı kayıpları görülmüştür. Bu basınç ve eğilme dayanım kayıplarının SRA'nın hidratasyon kinetiğini etkileyerek hidratasyonu ertelemeleri ve SRA'nın betonun jel yapısındaki parçacıklar arasındaki boşluk miktarlarını etkileyerek bağlar arası mesafeyi artırma özelliğiyle ilişki olduğu söylenebilir.

Na_2SO_4 içeren kürde, İKÇ'lerine tabi tutulan numunelerin basınç ve eğilme dayanımları, su küründe bekletilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ile karşılaştırıldığında, İKÇ'lerine maruz kalan KYB0 ve KYB1 numunelerinin her ikisi de basınç ve eğilme dayanımı kaybına uğramışlardır.

SRA katkısının, su küründe bekletilen numunelerin genleşmesine katkıda bulunduğu görülmüştür. SRA katkısının erken yaşlarda genleşmeyi daha fazla artırdığı, genleşmeye olan etkisinin geç yaş dönemlerinde giderek azaldığı görülmüştür. Bu artan genleşme değerleri üzerinde, ortam nemi ve numune içi neminin etkili olacağı düşünülmektedir. Ayrıca kullanılan SRA katkısının gliko ester ve sülfat alüminat bazlı olmasının da bu genleşmeler üzerinde bir başka etken olabileceği düşünülmektedir.

Kuruma rötresi deney sonuçlarına bakıldığında; SRA katkısının büzülmeyi azaltmada katkı sağladığı görülmektedir. Gözenek çözeltisinde ki gerilmelerin, doğrudan yüzey gerilmeleri ile orantılı olması nedeniyle, SRA'ların yüzey gerilimini düşürerek kuruma rötresi azaltmada yardımcı olduğu görülmüştür. SRA katkısı kullanımı ile doğru kür ve ortam koşullarında özellikle kuruma rötresinin nihai değerinin azaltılacağı görülmüştür.

Na_2SO_4 içeren kürde IKÇ'lerine maruz bırakılan, %1 SRA katkılı KYB1 numunesinin kontrol numune KYB0'a göre daha fazla genleştiği görülmüştür. Genleşme ve büzülmenin birlikte görüldüğü IKÇ'lerinde, KYB1 numunesinde SRA katkısının kuruma çevrimi esnasında erken yaşlarda etkili olarak, daha az büzülmesine sebep olduğu, ıslanma esnasında boşluklar üzerinde etkili olan SRA sebebiyle daha fazla genleştiği ve nihai boy değişiminde, SRA katkılı numunelerin daha fazla genleştiği düşünülmektedir.

Kısıtlanmış rötre deneylerinde %1 SRA katkılı KYB1 ile üretilen halka numunesinin ilk çatlak oluşumu 15. günde meydana gelirken, kontrol numune KYB0'de ilk çatlak oluşumu 12. günde meydana gelmiştir. SRA içeren karışımların 90 gün sonunda çatlak genişliğini %30 oranında azalttığı, çatlama yaşını geciktirdiği görülmüştür.

Kılcallık deneyinde SRA katkılı KYB1 numunelerin 120 dk sonunda aynı alandan KYB0 numunesine göre yaklaşık 1,74 kat daha fazla kapiler olarak su emdiği gözlenmiştir.

SEM görüntüleri incelediğinde bütün numunelerde CSH jelleri açıkça görülmektedir. İçerdiği katkı ve kür şartlarına göre CSH jellerinin yoğunluğu değişmektedir. Kontrol numunede CSH jelleri yoğunluğu yüksek olurken, bunun dayanım artışlarını desteklediği ve yüksek dayanım tezini doğruladığı görülmüştür.

Numunelerin sülfat küründe IKÇ uygulandıktan sonra zaman içinde fiziksel özelliklerinin değiştiği, numunelerin kuruma durumunda iken yüzeylerinde beyazlaşmalar ve pullanmalar görülmüştür. IKÇ sayısı arttıkça hasar durumunun arttığı özellikle kenar ve köşe yerlerinden dökülmeler görülmüştür. 180. gün sonunda numunelerin yüzeylerinde dökülmeler ve kütle kayıpları görülmüştür. Numune yüzeylerinde kristalleşmiş sülfat iyonlarına rastlanılmış fakat gözle görülebilen çatlaklara rastlanılmamıştır.

5.2. Öneriler

Geniş katkı dozajı aralığında ve farklı türde SRA'lar kullanarak yapılan bir çalışmanın, SRA'nın taze beton özelliklerine, büzülmeye, uzun ve kısa vadede, gerilmelere, çatlak yaşına, çatlak gelişimine olan etkisinin daha iyi anlaşılacağı düşünülmektedir.

SRA'nın gecikmiş olarak eklenmesi örneğin santral ortamında değil şantiyede eklenecek olması hidrasyon gecikmesini azaltmada yardımcı olacağı ve dayanım kayıpları üzerinde etkili olacağı düşünülmektedir [100,104].

Sülfat etkisi ve IKÇ deneyinde, deney süresinin daha uzun tutularak ve çevrim sayısının artırılarak, dayanıklılığa etkisinin daha net anlaşılacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]EFNARC,2002,Spesification and Guidelines for Self Compacting Concrete,UK
- [2]The European Guidelines for SCC,Spesification,Production and Use,2005,syf 1-68
- [3]Grdić, Z., Despotovic, I., Curcic, G.T., Proporties of Self Compacting Concrete with Different Types of Additives, Architecture and Civil Engineering Vol. 6 No:2, pp. 173-177,2008
- [4]Goodier, I.C., Development of Self Compacting Concrete, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings 156 , Issue SB4, pp 405-414, 2003
- [5]Folliard, K.J., Berke, N. S., Properties of High-Performance Concrete Containing Shrinkage-Reducing Admixture, Cement and Concrete Research, 27:9, pp.1357-1364, 1997
- [6]Uysal, M., Mineral Katkılar Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özelliklerinin Ve Dayanıklılığının İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2010
- [7]Quangphu, N., Linhua, J. Jiaping, L. Qian, T. , Tienquan,D., Influence of shrinkage-reducing admixture on drying shrinkage and mechanical properties of high-performance concrete, Water Science and Engineering, Vol. 1, No. 4, 67-74,2008
- [8]Ulukaya, S., Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Rötire ve Rötire Çatlaklarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008
- [9]Pehlivan, M., Betonun Rötresi Üzerine Bir Çalışma, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi,2008

- [10]Saliba, J., Rozière, E., Grondin, F., Loukili, A., Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Plastic and Long-Term Shrinkage, Cement and Concrete Composites 33, pp. 209–217, 2011
- [11]Kadioğlu, T., Rötire Azaltıcı Katkı Maddeleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006
- [12]Shah, S.P., Karaguler, M.E., Sarigaphuti, M., Effects of Shrinkage Reducing Admixture on Restrained Shrinkage Cracking of Concrete, ACI Materials Journal, 89: 3, pp. 88-90, 1992,
- [13]Dhiyaneshwaran, S., Ramanathan, P., Baskar, I., Venkatasubramani, R., Study on Durability Characteristics of Self-Compacting Concrete with Fly Ash, Jordan Journal of Civil Engineering, 7:3,pp.342-353, 2013
- [14]Sağlık, A., Beton ve Kimyasal Katkı Teknolojisinde Yeni Gelişmeler ve Standartlar, TMMOB, KMO ve İMO, Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Syf 83-117,2005
- [15]Demirci, E.E. , Şahin R. , 2013 , Kendiliğinden Yerleşen ve Geleneksel Betonun Ünifomrlulukların Karşılaştırılması,2013 Beton Hazır Kongresi,Syf 271-280
- [16]Topçu, B.İ., Ünal, O., Uygunoğlu, T., Kendiliğinden Yerleşen Betonda Mineral Katkıların Taze Beton Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması, 2.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Syf 181-193, 2007
- [17]Özkul, H., Doğan, Ü.A., Kendiliğinden Yerleşen Betonların Geçirimlilik Özellikleri, 5. Ulusal Beton Kongresi, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı ,Syf 111- 122, 2003.
- [18]Felekoğlu, B., Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,2003

- [19]Kandemir, A., Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kalıcılık Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2005
- [20]Schutter, G.D., Bartos, P.J.M., Gibbs, J., Domone, P., Self Compacting Concrete, Whittles, pp 274, 2007
- [21]Garip, Z., Kendiliğinden Yerleşen Yüksek Dayanımlı Betonların Depreme Dayanıklılık Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011
- [22]Açıkgenç, M., Karataş, M., Ulucan, Z., Elazığ Yöresine Ait Atık Tuğla Ve Kireç Taşı Tozunun Kendiliğinden Yerleşen Harcın Mühendislik Özelliklerine Etkisi,Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Cilt 19, Sayı 6, Syf 249-255, 2013
- [23]Brouwers, H. J. H., Radix, H. J, Self-Compacting Concrete: Theoretical And Experimental Study, Cement And Concrete Research, 35:11, 2116-2136, 2005
- [24]Yalçinkaya, Ç., Mineral Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Lifli Betonun Mekanik, Durabilite ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2009
- [25]M.S. Shetty, “Self-Compacting Concrete” in Concrete Technology Theory and Practice, 7th ed., vol. 1, pp.572-588, S. Chand and Company Private Ltd., Ram Nagar, New Delhi, 2013
- [26]Özkul, H., Kendiliğinden Yerleşen Betonların Genel Özellikleri, Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara, Bildiriler Kitabı, ss. 119-136, 2005
- [27]Okamura, H., Ouchi, M., Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 1:1, pp. 5-15., 2003

- [28]TS 802: Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, TSE, Ankara, 2016
- [29]Li, Z., Advanced Concrete Tecnology , John Wiley and Sons , pp 305,New Jersey, 2011
- [30]Ormancı, A., Kendiliğinden Yerleşen Şapların Taze ve Sertleşmiş Haldeki Özellikleri ve Üretim Süreci, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul,2009
- [31]Kaymak, H., Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Metakaolin ve Kalsit Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Niğde, 2010
- [32]Kaya, A.O., Farklı Türde Mineral Katkı Kullanımının Kendiliğinden Yerleşen Betonun Taze Faz ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul,2010
- [33]Sarıdemir, H., Mineral ve Süperakışkanlaştırıcı Katkılarının Kendiliğinden Yerleşen Betonun İşlenebilme ve Basınç Dayanımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2005
- [34]Orhan, E., Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Katkı Oranları Değişiminin Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2012
- [35]Türkiye Hazır Beton Birliği, Kendiliğinden Yerleşen Beton Kılavuzu, Nisan 2007,Syf 47-49
- [36]Topçu, İ.B., Canbaz, M., Karakurt,C. , Beton Üretiminde Kimyasal Katkı Kullanımı, Politeknik Dergisi Cilt 9:Sayı 1, Syf 59-63, 2006
- [37]Giraudeau, C., Lacaille J., Souguir, Z., Nonat, A. , Flatt, R., Surface and Intercalation Chemistry of Polycarboxylate Copolymers in Cementitious Systems, Journal of the American Ceramic Society, 92:11, pp 2471–2488, 2009

- [38]Evangeline, K., Neelamegam, M., Effect of Superplasticizer on Workability and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, p 18-29, 2015
- [39]Nawa, T., Effect of Chemical Structure on Steric Stabilization of Polycarboxylate-based Superplasticizer,Journal of Advanced Concrete Technology , Vol. 4:2, pp.225-232, 2006
- [40]Işık, İ.E., Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Viskozite Düzenleyici Katkı Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul,2005
- [41]Collepari, M., A Very Close Precursor of Self-Compacting Concrete (SCC), Supplementary volume of the Proceedings of Three-day CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology, S. Francisco (USA), pp. 430-450, 2001.
- [42]Türkel, S., Felekoğlu, B. , Aşırı dozda akışkanlaştırıcı kullanımının taze ve sertleşmiş betonun bazı özelliklerine etkisi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 6: 1, Syf 77-89, 2004
- [43]Gödek, E. , Felekoğlu, B. , Felekoğlu K. , Hazır Beton Sektörüne Uygun Polikarboksilat Esaslı Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Seçimi ve Kendiliğinden Yerleşen Beton Üretimindeki Performansı, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15:025602, Syf 210-220, 2015
- [44]Tohumcu, İ., Bingöl, A.F., Silis Dumanı Ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Beton Özellikleri ve Basınç Dayanımları, Deü Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15:2, s.31-44, 2013
- [45]Gönen, T., Kendiliğinden Yerleşen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekaniksel ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2009
- [46]Kılınç, C. , Kendiliğinden Yerleşen Betonlar, Hazır Beton Dergisi Temmuz-Ağustos, Syf 70-75, 2012

- [47]Ünsal, A., Şen, H., Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneyleri, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Malzeme Laboratuvarları Şubesi Müdürlüğü,2008,
- [48]Erdoğan, T.Y., Beton, Ders Kitabı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yay. ve İletişim AŞ Yay 2. ,syf 446-455, Ankara, 2003
- [49]Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., Beton ,Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No:334, Syf 423-474, İzmir, 2012
- [50]TS EN 206-1, Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002
- [51]Aydın, F. , Sarıbiyık, M., Correlation between Schmidt Hammer and Destructive Compressions Testing for Concretes in Existing Buildings, Scientific Research and Essays, Vol. 5:13, pp. 1644-1648, 2010
- [52]Brencich A., Cassini, G., Pera, D., Riotto, G., Calibration and Reliability of the Rebound (Schmidt) Hammer Test, Civil Engineering and Architecture ,Vol 1:3, pp 66-78, 2013
- [53]Yerinde Beton Basınç Dayanımının Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi, www.akcansa.com.tr/docs/20120216160556_karot.pdf. (Erişim tarihi 15.09.2016)
- [54]Topçu, İ.B., Uğurlu, A., TS 500/2000 Standardının Beton Açısından İncelenmesi, ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, syf 492-499, Ankara, 2002
- [55]Baradan, B., Yazıcı, H., Betonarme Yapılarda Durabilite ve TS EN 206-1 Standardının Getirdiği Yenilikler, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 426 2003-4, Syf 62-69,2003
- [56]Baradan, B., Yazıcı H., Ün, H., Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, Syf 95-99, İstanbul,2010

[57]Baradan, B., Aydın, S., Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık,Kalıcılık), Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, Syf 265-288, 2013

[58]Kandemir, H., Farklı Mineral Bağlayıcı Bileşenlerin Betonun Kalıcılığına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul,2014

[59]Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., Beton , Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:334 , Syf 563-568, İzmir,2012

[60]Akın, M., Kalsit Esaslı Betonların Geçirimlilik ve Durabilite Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul,2009

[61]Erdoğan, Ş., Kandil, U., Nayır, S., Farklı Oranlarda Uçucu Kül İkame Edilerek Üretilen Betonların Klor Geçirimliliklerinin Belirlenmesi, 9. Ulusal Beton Kongresi, Syf 59-69 Antalya, 2015

[62]Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı, İTÜ Mühendislik Dergisi Cilt 1 Sayı 2, Syf 125-144, 2002

[63]Trezos, K.G., Sfikas, I.P., Pavlou, D.I., Water Permeability of Self Compacting Concrete, 3rd fib International Congress, pp 1-10, 2010

[64]Erdoğan, T.Y., Beton, Ders Kitabı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yay. ve İletişim AŞ Yay 2., Syf 581-583, Ankara, 2003

[65]Tosun, K., Felekoğlu, B., Baradan B., Altun, İ.A., Portland Kalkerli Çimento Bölüm II – Sülfat Dayanıklılığı, İMO Teknik Dergisi Yazı 310, Syf 4737-4757, 2009

[66]Doğruyol, M., Karaşin H., Sülfatın beton ve betonarme elemanlara olumsuz etkisi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi,Cilt2 Sayı 2,s 79-85, 2011

- [67]Bassuoni, M.T., Nehdi, M.L., Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading, Cement and Concrete Research 39:3 , pp206-226,2009
- [68]Mehta, K.P., Monterio, P.J.M., Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, McGraw-Hill Publishing, Third Edition, pp 35-41, 2006
- [69]Öner, A., Direr S., Sevgül T., Islanma Kuruma Çevrimi - Dinamik Elastisite Modülü İlişkisi, Türkiye İnşaat Mühendisliği 17. Teknik Kongre ve Sergisi Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, syf 448-450, 2004
- [70]Erten, E., Deniz Suyunun Çimento Tipi Farklı Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir,2009
- [71]Zhang, J., Gao, Y., Han, Y., Sun, W., Shrinkage and Interior Humidity of Concrete under Dry–Wet Cycles, Drying Technology An International Journal, 30:p.p 583–596, 2012
- [72]Köksal F., Güllü H., Güner A.,Islama-Kuruma Etkisindeki Betonlarda En Uygun Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Oranları, IV. Ulusal Beton Kongresi, , İstanbul, s.245-256, 1996
- [73]Oliveira, P.L, Gomes, J.P.C., Pereira, C.N.G., Study Of Sorptivity Of Self-Compacting Concrete with Mineral Additives , Journal Of Civil Engineering And Management, , Vol XII, No 3, pp.215–220, 2006
- [74]Pease, B.J., The Role of Shrinkage Reducing Admixtures on Shrinkage , Stress Development, and Cracking,PhD Thesis, Purdue University, 2005
- [75]ACI Committee 116R-90, Cement and Concrete Terminology, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1 , 1994
- [76]Bilir, T., Harçlarda Endüstriyel Yan Ürün veya Atıkların İnce Agregası Olarak Kuruma Rötresi Çatlaklarına Etkisi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi,2010

[77]ACI 209.1R-05,Report on factors affecting shrinkage and creep of hardened concrete, Farmington Hills, USA, 2005

[78]Fleurimond, C., Effect of Mixing Parameters on Restrained Shrinkage Behavior of Self Consolidating Concrete, Graduate School – New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey, 2011

[79]Anonim, Shrinkage of concrete, [keu92.org / uploads / ... / Shrinkage / % 20of % 20concrete.pdf](http://keu92.org/uploads/.../Shrinkage/%20of%20concrete.pdf), (Erişim tarihi 14.06.2016)

[80]E.,Oskar, Early age properties of self-compacting concrete-Effects of fine aggregate and limestone filler, Chalmers University Of Technology,Sweeden,2007

[81]http://www.theconcreteportal.com/dimen_shrink.html,(Erişim tarihi 17.06.2016)

[82]Muratoğlu, Y., Kendiliğinden Yerleşen Betonda Farklı Filler Malzemelerin Rötire Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, 2009

[83]Zongjin, L., Advanced Concrete Technology, Hoboken, John Wiley and Sons, Inc, pp 164-248, 2011

[84]Yatağan, S., Beton ve Harçlarda Agrega Dane Boyutunun Rötire ve Durabilitiye Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2010

[85]Erdoğan, T.Y., Beton, Ders Kitabı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yay. ve İletişim Aş Yay 2., s 579-611, Ankara, 2003

[86]Drying Shrinkage of Cement and Concrete, Cement Concrete and Aggregates Australia ,pp 1-6 , 2002

[87]M.S. Shetty, “Self-Compacting Concrete” in Concrete Technology Theory and Practice, 7th ed., vol. 1, pp.325-348 S. Chand and Company Private Ltd., Ram Nagar, New Delhi, , , 2013

- [88]Bilal, C., Kütle Elemanlarda Erken Yaş Çatlak Riskinin Belirlenmesi ve Uygulama ile Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi ,İstanbul, 2013
- [89]Dang,Y., Qian, J., Qu,Y., Zhang L., Wang,Z., Qiao, D., Jia, X, Curing cement concrete by using shrinkage reducing admixture and curing compound, Construction and Building Materials 48 (2013) 992–997,
- [90]Han,S.H., Kim, K.J., Jung, W.Y., Development and Performance Assessment of the High-Performance Shrinkage Reducing Agent for Concrete, Advances in Materials Science and Engineering ,Volume 2016, Article ID 9318086, 8 pages
- [91]W. Yang, The Issues and Discussion of Modern Concrete Science, Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015,pp,133-150
- [92]Nassif H., Aktas,K., Najm, H., Concrete Shrinkage Analysis for Bridge Deck Concrete, Final Report, New Jersey Department of Transportation Bureau of Research and U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration,2007
- [93]Z., Xiangming, Asce, M., Dong,W., Oladiran, O., Experimental and Numerical Assessment of Restrained Shrinkage Cracking of Concrete Using Elliptical Ring Specimens, J. Mater. Civ. Eng. 2014.26., pp 04014087-1-04014087-8
- [94]Matulová, K., Unčík, S., Effect of shrinkage reducing admixtures (SRA) on selected properties of cement mortars, Journal of Civil Engineering and Architecture Research Vol. 1, No. 4, pp. 278-282, 2014
- [95]Pendergrass, B., Low-cracking high-performance concrete (lc-hpc) bridge decks: shrinkage-reducing admixtures, internal curing, and cracking performance, Civil Engineering and the Graduate Faculty of the University of Kansas,2014
- [96]Eberhart, A.B., On the mechanisms of SRA in self consolidating mortars and concrete, Construction Chemicals, Aachen, pp226-231,2011

- [97]Maruyama, I., Beppu, K., Kurihara, R., Furuta, A., Action Mechanism of Shrinkage Reducing Admixture in Hardened Cement Paste, Journal of Advanced Concrete Tecnology Vol. 14, pp. 311-323 , 2016
- [98]Gettu, R., Aguado, A., Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete, Cement and Concrete Research 39 ,pp 141–146, (2009)
- [99]Vojtko, D.M., Quantifying the performance of macrosynthetic fiber reinforcement and shrinkage reducing admixtures in large scale concrete slabs, Master of Science in Civil Engineering, Indiana ,2011
- [100] New Developments in Shrinkage Reducing Admixtures, Rebuild “Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Early-Age Properties of Cement Pastes” by Dale P. Bentz, Journal of Advanced Concrete Technology Vol.4,No.3,423-429,October 2006
- [101] Rodden, R.A., Lange, D.A., Feasibility of Shrinkage Reducing Admixtures for Concrete Runway Pavements, Center of Excellence for Airport Tecnology Technical Note 4, University of Illinois, Dept of Civil and Environmental Engineering,2004
- [102]Corinaldesi, V., Combined effect of expansive, shrinkage reducing and hydrophobic admixtures for durable self compacting concrete, Construction and Building Materials 36, pp,758–764,2012
- [103]Gettu, R., Roncero J., Martin, M.A., Long Term Behaviour of Concrete Incorporating a Shrinkage-Reducing Admixture, The Indian Concerete Journal, pp.1-7, 2002
- [104]Rajabipour, F., Sant, G., Weiss,J., Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution, Cement and Concrete Research, 38.5, pp.606-615, 2008