

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN TAZE HALDEKİ  
TEMEL ÖZELLİKLERİ ve SÜLFAT DİRENCİ ÜZERİNE İRİ  
AGREGA ÇEŞİDİ ve ÇİMENTO TİPİNİN ETKİSİ**

**Meşküre AKARSU**


**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**


**ERZURUM**


**2009**

**Her hakkı saklıdır**

Yrd. Doç. Remzi ŞAHİN danışmanlığında Meşküre AKARSU tarafından hazırlanan bu çalışma 20/02/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Remzi ŞAHİN İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hikmet ALTUN İmza : 

Üye : ..... İmza :

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

Prof. Dr. Ömer AKBULUT  
**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN TAZE HALDEKİ TEMEL ÖZELLİKLERİ ve SÜLFAT DİRENCİ ÜZERİNE İRİ AGREGA ÇEŞİDİ ve ÇİMENTO TİPİNİN ETKİSİ

Meşküre AKARSU  
Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Remzi ŞAHİN

Bu çalışmada çimento tipi ve iri agrega çeşidinin Kendiliğinden Yerleşen Betonun (KYB) taze haldeki temel özellikleri (viskozite, akıcılık, geçme yeteneği ve ayrışma direnci) ve sülfat direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

İri agrega olarak kırmataş kalkerler (beyaz ve gri), kırmataş bazaltlar (farklı özgül ağırlık ve su emme değerli) ve yuvarlak agrega seçilmiştir. Çimento tipi olarak ise Normal Portland Çimentosu (CEM I 42.5 R), Portland Kompoze Çimento (CEM II/B-M 32.5 R), Kompoze Çimento (CEM V/A 32.5 N), Sülfata Dayanıklı Çimento ve Kalsiyum Alüminatlı Çimento kullanılmıştır. Bu parametrelerle üretilen 25 grup numune üzerinde taze beton deneyleri yapılmış ve 24 hafta süreyle %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içeren sülfatlı ortamda saklanarak ağırlık değişimleri ölçülmüştür.

Sonuç olarak; KYB'nin viskozite, akıcılık ve geçme yeteneği üzerinde yuvarlak agrega en iyi performansı göstermiş iken ayrışma direncinde üzerinde beyaz kalkerin daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Diğer taraftan, Sülfata Dayanıklı Çimento viskozite üzerinde, Kompoze Çimento ise akıcılık, geçme yeteneği ve ayrışma direnci üzerinde daha iyi sonuç vermiştir. Kalsiyum Alüminatlı Çimento ile üretilen betonlarda ise gözle görülebilen bir ayrışma gerçekleşmiştir.

Hem sülfatlı ortam hem de kirece doymuş su içinde saklanan numunelerin ağırlıklarında artış gözlenmiştir. Ancak sülfatlı ortamdaki ağırlık artışı kontrol numunelerinkinden daha fazla olmuştur. Sülfatlı ortamda en fazla ağırlık artışının Kalsiyum Alüminatlı Çimento en az ise Portland Çimento içeren karışımlarda olduğu tespit edilmiştir. Kalsiyum Alüminatlı Çimento'lu karışımlarda görülen bu artış, sülfat etkisinden ziyade, ayrışmaya bağlanmıştır. Portland Çimentosu'nun diğer çimento tiplerine göre daha iyi sonuç vermesi ise çimentonun kimyasal bileşiminden kaynaklanmayıp bu çimentoyla üretilen betonların geçirimsizliklerinin düşük olmasından kaynaklanmıştır. İri agrega çeşidi açısından yapılan değerlendirmede ise sülfatlı ortamda en az ağırlık değişimi beyaz kalkerli en çok ise yuvarlak agregalı karışımlarda görülmüştür. Kendiliğinden yerleşen betonlar üzerinde sülfat etkisinin tam olarak belirlenmesi için deney süresinin oldukça uzun tutulması gerekmektedir.

2009, 84 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Kendiliğinden Yerleşen Beton, çimento tipi, iri agrega çeşidi, sülfat direnci

## ABSTRACT

Ms Thesis

### EFFECT OF COARSE AGGREGATE AND CEMENT TYPES ON THE MAIN CHARACTERISTICS AND SULPHATE RESISTANCE OF SELF COMPACTING CONCRETE

Meşküre AKARSU

Ataturk University  
Graduate school of Natural and Applied sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

In this study, the effect of cement type and the kind of coarse aggregate on the basic properties of self compacting concrete in fresh state (viscosity, fluidity, passing ability and segregation) and sulphate resistance was investigated.

Crushed limestone (white and grey), crushed basalt (with different values of specific gravity and water absorbing) and gravel aggregate were selected to be coarse aggregates. As the cement types, Normal Portland Cement (CEM I 42.5 R), Portland Composed Cement (CEM II/B-M 32.5 R), Composed Cement (CEM V/A 32.5 N), Sulphate Resistant Cement and Cement Calcium Aluminate Cement were used. Fresh concrete experiments were conducted on 25 groups of samples produced using these parameters and these samples were stored in the sulphated medium consisting of %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> for 24 weeks and changes in their weights were measured.

Consequently, it was found that gravel aggregate showed the best performance on the viscosity, fluidity and passing ability of Self-Compacting Concrete, while white limestone gave better results on segregation. On the other hand, Sulphate Resistant Cement gave better results for viscosity while Composed Cement for fluidity, passing ability and segregation. Observable segregation was seen on the concretes produced with Calcium Aluminate Cement.

Increase in the weight of samples from the groups stored in both sulphated environment and water saturated to lime was observed. However, increase in the weight of samples in sulphated environment was larger than that of control samples. It was determined that the largest weight increase in sulphated environment was seen in the mixtures consisting of Calcium Aluminate Cement while the lowest was in the mixtures with Portland Cement. This increase seen in the mixtures with Calcium Aluminate Cement was attributed to segregation rather than sulphate effect. The fact that Portland Cement gave better results than the others does not result from the chemical composition of the cement, but from the lower permeability of the concretes produced with this cement. When considered the evaluations for coarse aggregate type, the lowest weight change in sulphated environment was seen in the mixtures with white limestone while the largest was in the mixtures with gravel aggregate. The time period of the experiments should be kept quite long in order to better determine the effect of sulphate on the self compacting concrete.

**2009, 84 pages**

**Keywords:** Self-Compacting Concrete, cement type, coarse aggregate type, sulphate resistance

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Remzi ŞAHİN'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın değişik aşamalarında yardım ve desteklerini esirgemeyen Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden Sayın Arş. Gör. Meral OLTULU ve tek. İlhami AYHAN'a teşekkür ederim. Ayrıca;

Nuh Beton A.Ş. Kalite Müdürü Mehmet MUTLU'ya,  
Ankara Set Çimento'dan Süleyman Mete TURAN'a ve Murat AKAY'a,  
Ambarlı Set Çimento'dan Ramazan ABAY'a,  
ÇİMSA Çimento Sanayi A.Ş.'ye,  
Aşkale Çimento Hazır Beton Tesisi'nden Yılmaz BOYALICI ve Şahin KARA'ya,  
Ergünler Yol Yapı İnşaat'a ve  
BASF Yapı Kimyasalları'na  
teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman ve her konuda yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme de şükranlarımı sunarım.

Meşküre AKARSU

Şubat 2009

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonnun Kullanım Alanları.....	5
1.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mühendislik Özellikler.....	5
1.3. Kendiliğinden Yerleşen Beton Kullanımının Avantajları.....	7
1.4. Kendiliğinden Yerleşen Beton Kullanımının Dezavantajları.....	8
1.5. Kaynak Özetleri.....	10
1.6. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı.....	17
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>19</b>
2.1. Sülfatın bulunduğu ortamlar.....	22
2.2. Reaksiyon gelişimini etkileyen faktörler.....	23
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>26</b>
3.1. Materyal.....	26
3.1.1. Agrega.....	26
3.1.2. Çimento.....	27
3.1.3. Karışım suyu.....	28
3.1.4. Uçucu kül.....	29
3.1.5. Yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı (SA).....	28
3.2. Deneyde kullanılan aletler.....	28
3.3. Yöntem.....	29
3.3.1. Granülometri eğrisinin belirlenmesi.....	30
3.3.2. Parametreler ve kodlama.....	30
3.3.3. Beton karışım hesapları.....	31
3.3.4. Betonun üretilmesi.....	32
3.3.5. Taze beton deneyleri.....	34
3.3.5.1. Birim ağırlık deneyi.....	34
3.3.5.2. KYB'nin taze haldeki temel özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler.....	35
3.3.5.2.1. Yayılma deneyi ve T <sub>500</sub> süresi ölçümü.....	35
3.3.5.2.2. U-Kutusu deneyi.....	35
3.3.5.2.3. Elek ayrışması deneyi.....	36
3.3.6. Sertleşmiş beton deneyleri.....	37
3.3.6.1. Basınç dayanımı deneyi.....	38
3.3.6.2. Sülfat deneyleri.....	38
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>	<b>41</b>
4.1. Taze Beton Deneylerinin Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	41
4.1.1. Birim ağırlık deneyinin değerlendirilmesi.....	42
4.1.2. KYB'lerin taze haldeki temel özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler.....	44
4.1.2.1. T <sub>500</sub> süresi deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	44

4.1.2.2. Yayılma deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	49
4.1.2.3. U-Kutusu deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi .....	52
4.1.2.4. Elek ayrışması deneyinin değerlendirilmesi .....	55
4.2. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	59
4.3. Sülfat Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi .....	62
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>74</b>
KAYNAKLAR .....	79
EK .....	83
ÖZGEÇMİŞ .....	

## SİMGELER DİZİNİ

cm <sup>2</sup>	santimetrekaare
dk	dakika
dm <sup>3</sup>	desimetreküüp
gr	gram
kg	kilogram
m <sup>2</sup>	metrekare
mm	milimetre
MPa	megapaskal
µm	mikrometre
N	Newton
Sn	saniye



## KISALTMALAR

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
TS	Türk Standartları
BK	Beyaz Kalker
GK	Gri Kalker
B1	Yüksek özgül ağırlık düşük su emme değerli Bazalt
B2	Düşük özgül ağırlık yüksek su emme değerli Bazalt
NA	Yuvarlak Agregası
AÇ	Kalsiyum Alüminatlı Çimento
PÇ	Normal Portland Çimentosu
PKÇ	Portland Kompoze Çimento
KZÇ	Kompoze Çimento
SDÇ	Sülfata Dayanıklı Çimento

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Betonun sülfat dayanıklılığı ile geçirimsizliği arasındaki ilişki	25
Şekil 3.1. Digital boy ölçüm cihazı	30
Şekil 3.2. Yayılma deneyinin yapılması (a) ve yayılma çapının ölçülmesi (b)	36
Şekil 3.3. U-Kutusu Deneyi	37
Şekil 3.4. Elek ayrışması deney düzeneği ve deneyin yapılması	37
Şekil 3.5. Sertleşmiş beton deneyleri için üretilen numuneler	38
Şekil 3.6. Numunelerin %10 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltisinde saklanması	40
Şekil 4.1. KYB'nin birim ağırlıklarının agrega ve çimento türüne göre değişimi	43
Şekil 4.2. T500 süresinin agrega ve çimento türüne göre değişimi	46
Şekil 4.3. Yayılma çapının agrega ve çimento türüne göre değişimi	51
Şekil 4.4. Geçme yeteneğinin agrega ve çimento türüne göre değişimi	54
Şekil 4.5. KYB'lerin ayrışma direncinin agrega ve çimento türüne göre değişimi	57
Şekil 4.6. AÇ'li karışımlarda görülen ayrışma (a: taze halde, b: sertleşmiş durumda)	60
Şekil 4.7. Agrega ve çimento türüne göre beton basınç dayanımlarının değişimi	61
Şekil 4.8. Alüminatlı çimento (AÇ) içeren kontrol ve sülfat etkisindeki numunelerde görülen ağırlık değişimi yüzdesi	64
Şekil 4.9. Portland çimentosu (PÇ) içeren kontrol ve sülfat etkisindeki numunelerde görülen ağırlık değişimi yüzdesi	66
Şekil 4.10. Portland kompoze çimento (PKÇ) içeren kontrol ve sülfat etkisindeki numunelerde görülen ağırlık değişimi yüzdesi	67
Şekil 4.11. Kompoze çimento (KZÇ) içeren kontrol ve sülfat etkisindeki numunelerde görülen ağırlık değişimi yüzdesi	68
Şekil 4.12. Sülfata dayanıklı çimento (SDÇ) içeren kontrol ve sülfat etkisindeki numunelerde görülen ağırlık değişimi yüzdesi	69

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. KYB'nin taze özellikleri için geliştirilen deney yöntemleri ve ölçülen değerler	4
Çizelge 2.1. Suların zararlı etkinlik dereceleri için sınır değerler	24
Çizelge 3.1. Agregaların özgül ağırlık ve su emme değerleri	27
Çizelge 3.2. Çimentoların teknik özellikleri	28
Çizelge 3.3. PÇBK karışımı için karışım hesabı	33
Çizelge 3.4. KYB bileşenlerinin teorik (T) ve gerçek (G) miktarları ( $\text{kg/m}^3$ )	34
Çizelge 4.1. Taze beton deneyleri sonuçları	42
Çizelge 4.2. 28 günlük basınç dayanımı deneyi sonuçları	61
Çizelge 4.3. % 10 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ortamında 24 hafta saklanan numunelerde başlangıç ağırlıklarına göre gerçekleşen ağırlık artışı (%)	69
Çizelge 4.4. Kirece doymuş su ortamında 24 hafta saklanan numunelerde başlangıç ağırlıklarına göre gerçekleşen ağırlık artışı (%)	70

## 1. GİRİŞ

Beton günümüzde çok yaygın olarak kullanılan kompozit bir malzemedir. Karıldıktan bir süre sonra istenilen şekil ve boyutlardaki kalıplara yerleştirilebilmesi, uygun malzeme ve yöntemlerle çok yüksek basınç dayanımlarına ulaşabilmesi, kolayca yanmaması, korozyona uğramaması, çelik donatılarla iyi bir aderans içinde bulunması ve bünyesinde kullanılan malzemelerin ekonomik olması betonun yaygınlaşmasının nedenleri arasındadır (Erdoğan 2003).

Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) ise etkili (yeni nesil) akışkanlaştırıcı kimyasalların keşfiyle beton teknolojisine uyarlanmış özel bir beton türüdür. Bu beton hem karışım dizaynı hem de üretim teknikleri açısından geleneksel betondan farklı özelliklere sahiptir (Felekoğlu 2004, Sağlam vd 2004).

KYB farklı kaynaklarda bir birine yakın anlamlarda ancak farklı ifadelerle tanımlanmaktadır. Kendiliğinden Yerleşen Beton İçin Avrupa Klavuzu (Anonim 2007)'na göre KYB "kendi ağırlığı ile akabilen ve sıkışabilen, homojenliğini koruyan ve herhangi bir ilave sıkıştırmaya gerek olmaksızın yoğun bir donatı olması durumunda dahi kalıbı tamamıyla doldurabilen beton"dur. Duyar (2006)'a göre ise KYB "beton dökümünde vibrasyon ve sıkıştırma gerektirmeyen, kendi ağırlığı ile yoğun donatılı bölgelerde bile kalıbı tamamen doldurabilen, sertleşmiş haliyle yoğunluğu, homojenliği ve kalıcılığı vibrasyonla kalıba yerleştirilmiş beton özelliklerinde olan beton"dur. Felekoğlu (2005) ise KYB'yi "kendi ağırlığı ile sık donatılı dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç veya dış vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen, bu özelliklerini sağlarken ayrışma ve terleme gibi problemler oluşturmayarak kohezyonu koruyabilen, çok akıcı kıvamlı özel bir beton" olarak tanımlamaktadır. Anonim (2006)'ya göre ise "dış etki olmadan kendi ağırlığı ile sık donatılı, dar ve derin kesitlere sıkışarak yerleşebilen, bu esnada ayrışmaya direnç gösteren, kimyasallar kullanarak hazırlanan betonlara Kendiliğinden Yerleşen Beton" denir.

KYB'nin ilk örneklerini oluşturan ve yerleştirmek veya sıkıştırmak için çok az vibrasyon isteyen geleneksel betonlar Avrupa'da 1970'lerin başından beri kullanılmaktaydı. Japonya'da azalan kalifiye iş gücü nedeniyle Tokyo Üniversitesi tarafından 1986 yılında araştırılmaya başlanmasıyla KYB'nin ilk adımları atıldı. KYB ile ilgili ilk araştırma sonuçları 1989 yılında yayınlanmaya başlamıştır. Japon araştırmacı Ozawa ve diğer Japon araştırmacıların yaptıkları çalışmaların en geniş özeti 1992 yılında İstanbul'da gerçekleştirilen uluslararası beton kongresinde yayınlanmıştır. Bu kongrede yapılan ön bulguların sunumu dünya üzerinde büyük yankı oluşturmuş, özellikle büyük depremlerle sarsılan Asya ülkelerinde ve iş gücünün pahalı olduğu Kuzey Avrupa ülkelerinde farklı yaklaşımlarla KYB uygulamalarına başlanmıştır. Avrupa'daki ilk KYB 1990'ların ortalarında İsveç karayolu yapılarında kullanılmıştır. Avrupa Birliği 1997–2000 yılları arasında uluslararası bir çalışma başlatarak Avrupa ülkelerinde KYB kullanımını arttırmayı hedeflemiştir (Duyar 2006).

KYB'yi normal betonlardan ayıran çeşitli karakteristikler vardır. Taze haldeki betonla ilgili olan bu özellikler; akıcılık, ayrışma direnci, geçme yeteneği ve viskozite'dir.

**Akıcılık** taze betonun kendi ağırlığı altında kalıp içerisinde akma ve bütün boşlukları doldurma yeteneğidir (Anonim 2007). KYB'nin temel özelliklerinden biri olan bu özellik kuvvetli dağıtma etkisine sahip bir yeni nesil akışkanlaştırıcı katkı ile sağlanır. Bu türden katkılar dağıtıcı etkisini çimento tanelerini aynı işaretli elektriksel yüklerle yüklerken aynı zamanda doldurma etkisi ile de ince tanelerin birbirlerini itmesine borçludur (Özkul vd 2005). Doldurma yeteneğinin sağlanması için KYB'nin taşıma, döküm, yerleştirme ve sertleşme aşamalarında herhangi bir ayrışma göstermeksizin yüksek akıcılığa sahip olması gerekir (Özkul 2002).

**Ayrışma direnci** betonun taze halde homojen yapısını muhafaza edebilme yeteneğidir (Anonim 2007; Duyar 2006). Bu özellik karıştırma, taşıma ve döküm işlemleri sırasında betonun homojenliğini koruyarak ince tanelerin askıda madde (süspansiyon) olarak kalabilme yeteneği olarak da tanımlanabilmektedir (Sağlam 2001; Sağlam ve Özkul 2006). Betonun yeterli ayrışma direncine sahip (veya homojen) olması viskozite artırıcı

katkı kullanılması veya karışımda kullanılan çimento veya mineral katkı (mikrosilika, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, toz kalker vb) miktarının arttırılması, böylelikle, su/çimento oranının azaltılması yolu ile sağlanır (Sağlam 2001).

**Geçme yeteneği** taze betonun donatı çubukları arasındaki boşluklar gibi dar boşluklardan akma yeteneğidir (Anonim 2007). Sağlam ve Özkul (2006)'da geçme yeteneği; betonun kalıpta sık donatılar vb. dar kesitlerin oluşturduğu engeller arasından agrega tanelerinin tıkanma yapmaksızın geçebilmesi olarak tanımlanmıştır.

**Viskozite** ise akma başladığı zaman bir malzemenin (KYB gibi) akmaya karşı direncidir. Viskozitenin düşmemesi için ince malzeme miktarının yüksek tutulması ve viskozite düzenleyici bir katkının kullanılması gerekir (Özkul vd 2005; Duyar 2006).

KYB teknolojisinde bu karakteristikler temel özellikler olarak nitelendirilmekte olup her bir karakteristik farklı deney yöntemi/yöntemleri ile ölçülmekte ve değerlendirilmektedir. Bu amaç için geliştirilen deney yöntemleri Çizelge 1.1'de toplu olarak verilmiştir.

Diğer taraftan, geleneksel betona kıyasla KYB'nin dizayn yöntemi ve üretim teknikleri de farklıdır. KYB için pek çok araştırmacı ve kuruluş farklı dizayn yöntemleri geliştirmiştir. Bu yöntemler genellikle klasik dizayn yöntemlerinden daha karmaşıktır ve özellikle malzeme kalite kontrolü açısından daha çok deneysel çalışma gerektirmektedir (Felekoğlu vd 2004). Etkin bir süperakışkanlaştırıcı yanında toplam ince agrega miktarı, viskozite artırıcı katkı kullanımı, su/bağlayıcı oranı, maksimum agrega boyutu, kum/toplam agrega oranı ve toplam iri agrega miktarı gibi parametreler KYB dizaynındaki temel farklılıkları oluşturmaktadır. Ayrıca bu betonlarda çimento-kimyasal katkı uyumu ayrı bir önem taşır (Sağlam vd 2004).

KYB'ların agrega gradasyonunda iri/ince agrega oranı daha düşük (yani ince agrega miktarı yüksek) ve bağlayıcı miktarı daha fazladır. Bundaki amaç her iri agrega

tanenin bir kat harç ile sarılmasının ve betonun kendi ağırlığı ile hareket edebilmesinin sağlanmasıdır (Duyar 2006). Bu durum, ayrıca, betonun donatılar arasındaki dar açıklıklardan veya boşluklardan geçerken agrega kenetlenmesini ve köprülenmeyi azaltır ve KYB'nin geçme yeteneğini artırır (Anonim 2007; Duyar 2006).

**Çizelge 1.1.** KYB'nin taze özellikleri için geliştirilen deney yöntemleri ve ölçülen değerler (Anonim 2007)

Özellik	Deney Yöntemi	Ölçülen değer
Akıcılık	Çökme-akma	Toplam yayılma
	Kajima Kutusu	Görsel doldurma
Viskozite	T <sub>500</sub>	Akma zamanı
	V-hunisi	Akma zamanı
	O-hunisi	Akma zamanı
	Orimet	Akma zamanı
Geçme yeteneği	L-kutusu	Geçme oranı
	U-kutusu	Yükseklik farkı
	J-halkası	Kademeli yükseklik, toplam akma
	Kajima kutusu	Görsel geçme yeteneği
Ayrışma direnci	Penetrasyon	Derinlik
	Elek ayrışması	Terleme yüzdesi
	Oturma kolonu	Ayrışma zamanı

Diğer taraftan, KYB dizaynında yeni nesil süper akışkanlaştırıcı (YNSA) kullanılarak düşük su/toz oranı sağlanmalıdır. Su miktarı en düşük seviyelerde olmasına rağmen mikro ayrışmalar ve/veya yayılma esnasında su kasma etkisi görülüyorsa karışıma viskozite düzenleyici katkıları eklenerek devam edilmelidir (Duyar 2006).

KYB'de mineral dolgu malzemelerinin ve katkı maddelerinin de ayrı bir yeri ve önemi vardır. Bu malzemelerinin tane büyüklüğü dağılımı, şekli ve su emmesi KYB'nin üretiminde su ihtiyacı/hassasiyetini ve sonuçta kullanım için uygunluğunu etkileyebilir. Kalsiyum karbonat bazlı mineral dolgu malzemeleri yaygın olarak kullanılan, mükemmel reoloji özellikleri veren ve iyi bir yüzey bitişi sağlayan malzemelerdir (Anonim 2007). Uçucu kül ve silis dumanı gibi mineral katkı maddeleri de, kohezyonunu arttırmaları nedeniyle, bu tür betonlarda özellikle kullanılmaktadır.

KYB'nin bileşenlerinin belirlenmesi, klasik betonlara göre daha fazla deneyim ve birikim gerektirmektedir. Örneğin, çok akıcı KYB iyi şekil değiştirmeyi sağlamak için görece düşük kayma değerine sahip olmalı fakat sertleşme başlayıncaya kadar terlemeye ve ayrışmaya yeterince dirençli olmalıdır (Sağlam 2001).

### **1. 1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanım Alanları**

KYB'ler oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Başlıca; beton prefabrik sektörü, hazır beton, betonarme yüksek yapılar, güçlendirme projeleri, vibratör gürültüsünün özellikle istenmediği yer ve zamanlar (ör. şehir merkezleri ve gece beton dökümlerinde) ve vibratör kullanımının olanaksız olduğu yerlerde kullanılır. Özellikle köprü ve viyadüklerin depreme karşı güçlendirilmesinde KYB kullanımı teknik, ekonomi, işçilik hatalarının aza indirilmesi ve uygulama hızı açısından çok avantajlı bir çözüm olarak görülmektedir (Anonim 2006).

Eleman bazında ise döşemeler ve duvarlar, kirişler ve kolonlar, mimari paneller, cephe elemanları, geniş elemanlar, detaylı kalıplar, karmaşık şekilli kalıplar, sık donatılı-dar kesitli betonarme yapılar, kısacası, betonarmenin her elemanında uygulanır.

Diğer taraftan, geleneksel betonlarda slump deneyi betonun taze özellikleri hakkında pek çok bilgi verirken KYB'de slump deneyi betondan istenilen özelliklerinden sadece birini irdelediği için yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle KYB ile inşa edilecek yapı elemanlarının durumuna göre (donatı durumu, kesit biçimleri, vb.) istenen deney yöntemi seçilmeli ve KYB dizaynları da buna göre yapılmalıdır (Duyar 2006).

### **1. 2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mühendislik Özellikleri**

KYB ve vibrasyonla yerleşen geleneksel betonun basınç dayanımları benzerdir. Ancak, aynı su/bağlayıcı oranına sahip bu iki türünden KYB'nin agrega-çimento hamuru ara yüzeyi daha iyi olduğu için (çünkü KYB'de vibrasyon uygulamasının yer almaması



agrega ile sertleşmiş çimento hamuru arasında daha iyi bir ara yüz oluşumuna katkıda bulunmaktadır) geleneksel betonlardan biraz daha fazla yüksek mukavemete sahiptir (Duyar 2006; Anonim 2007). Diğer taraftan, belirli bir beton sınıfı veya olgunluğu için KYB'nin çekme dayanımı geleneksel betonlarla aynı kabul edilebilir. Çünkü çimento hamuru hacminin miktarı (çimento+ince malzeme+su) çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir (Anonim 2007).

Betonun içerisinde en fazla hacme sahip olan agreganın tipi, miktarı ve E-modülü betonun elastisite modülü üzerine etkisi yüksektir. Pasta hacminin artırılması elastisite modülü değerini düşürebilir (Duyar 2006, Anonim 2007). KYB geleneksel vibrasyonlu betondan daha yüksek hamur içeriğine sahip olduğu için bazı farklılıklar beklenebilir ve E değeri biraz daha düşük olabilir. Fakat bu Eurocode (Anonim 2005)'de verilen formüllerde temel alınan güvenlik varsayımları içindedir.

Kalıcılık (Dürabilite), beton yapıların yapıldıkları ortamda servis hayatları süresince maruz kalacakları çevre şartlarına, istenilen teknik özelliklerinden kayıp vermeden, dayanması olarak tanımlanır ve TS EN 206-1(Anonim 2002a)'de belirtildiği şekilde sınıflandırılır. Bu tanım ve sınıflandırma beton dizaynında bağlayıcı miktarı, su/çimento oranı ve beton basınç dayanımı ile ilgili sınırlandırmalara neden olur. Bu şartlar hem geleneksel betonlar hem de KYB' ler için geçerlidir (Duyar 2006). Bununla birlikte doğru özelliklere sahip KYB aynı zamanda düşük geçirgenliğe de sahip olacağından zararlı çevresel etkilere karşı daha az zayıf noktaya ve daha iyi dayanıklılığa sahip bir malzeme ortaya çıkaracaktır (Anonim 2007).

Daha yüksek çimento hamuru hacmi nedeniyle KYB için sünme katsayısı aynı dayanımdaki normal betonun sünme katsayısından daha yüksek olabilir. Fakat bu farklılıklar daha küçüktür ve Eurocode'da verilen formül ve tablolardaki güvenli varsayımlarla telafi edilir (Anonim 2007).

Diğer taraftan, normal beton için Eurocode'da büzülme (rötre) ile ilgili verilen değer ve formüller KYB için de geçerlidir. Bununla birlikte, düşük su-çimento oranına sahip

KYB’de kuruma rötresi azalır ve otojen büzülme kuruma rötresini aşabilir (Anonim 2007).

KYB’nin yangın dayanımı da normal betonunkine benzerdir. Genellikle az geçirimli beton yüzey atmalarına karşı daha meyillidir; fakat şiddeti agrega tipine, beton kalitesine ve nem oranına bağlıdır. KYB yüksek dayanımlı düşük geçirimli beton şartlarını kolaylıkla sağlayabilir ve yangın şartları altında herhangi bir yüksek dayanımlı normal betonla benzer şekilde davranır (Anonim 2007).

### **1. 3. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları**

KYB’nin kullanılması ile geleneksel betonlara göre aşağıdaki avantajların sağlanması söz konusudur (Felekoğlu 2004):

1. Taze betonu sıkıştırma ihtiyacı ortadan kalkacağı için vibratör kullanımının yarattığı zaman, enerji ve para kaybının da ortadan kalkması söz konusudur. Vibratör kullanımının neden olduğu gürültü kirliliğinin önüne geçilecektir. Prefabrike beton sektöründe vibratör kullanımının kalıplara verdiği zarar ortadan kalkacağından kalıpların ekonomik ömürleri artacaktır.

2. Betonun sık donatılı perde tipi dar ve derin kesitlere kendi ağırlığı ile boşluk bırakmadan yerleşmesi betonun mekanik performansını artıracaktır. Özellikle deprem riski olan bölgelerde perde tipi kolon kullanımının yoğun olması ve bu elemanların sık donatılı olmaları vibratör kullanımını zorlaştırmaktadır.

3. Yeni nesil kimyasal katkıların kullanımıyla çok akıcı fakat düşük su/çimento oranına sahip yüksek mukavemetli beton üretilerek beton kalitesi hem dayanım hem de dayanıklılık açısından artırılmaktadır.

4. Efektif kimyasal katkıların KYB üretiminde kullanımıyla prefabrike sektöründe erken kalıp alma için özellikle kış aylarında uygulanan buhar kürü ortadan kaldırılabilir. Bu tür KYB'lerin erken dayanımı yüksek olacağından kalıp alma hızları artmakta,

dolayısıyla, inşaat hızında artışlar meydana gelmektedir. Prefabrike beton sektöründe erken kalıp alma sırasında meydana gelen üretim kayıpları geleneksel üretim yöntemlerinde %15-%20'lere ulaşırken KYB kullanımıyla bu kayıpların %5'e kadar düşürülebildiği rapor edilmiştir.

5. Bazı araştırmacılar KYB'nin tiksotropik davranışından ötürü yerleştirme sonrası kalıp basıncının azaldığını savunmaktadır.

6. KYB'nin perdahlanabilirliği geleneksel betona kıyasla daha rahattır. Beton dökümünü önemli ölçüde hızlandırır.

7. KYB kalıp yüzeylerinde sağladığı boşluksuz görünüm ile sıva ihtiyacını ortadan kaldırılabilir. Fakat bu durum aynı zamanda bir dezavantaja dönüşebilir; sıva yapılması gerekiyorsa pürüzsüz yüzeyi sebebiyle KYB sıva tutmayabilir.

8. KYB pompalanabilirlik açısından geleneksel betona göre daha avantajlıdır. Pompa içi basıncın geleneksel betona kıyasla ortalama % 20 azaldığı rapor edilmiştir. Bu durum taze KYB'nin tiksotropik yapısından kaynaklanmaktadır.

#### **1. 4. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dezavantajları**

Yukarıda belirtilen avantajlarına rağmen KYB'lerin bazı olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır (Felekoğlu 2004):

1. KYB malzeme maliyeti açısından normal betona kıyasla daha pahalıdır. Maliyeti artırıcı ana etken efektif kimyasal katkıların olup, gelecekte bu katkıların maliyetlerinin

düşmesi beklenmektedir. Fakat sadece malzeme maliyet açısından karşılaştırma yapmak hatalı olacaktır.

2. KYB'nin performansı malzeme tip ve oran değişikliklerine hassastır. Bu durum özellikle agrega nemi ve gradasyonu ile ilgilidir. Klasik betona göre daha sıkı kontrol gerekir. Bu da üreticiye ilave tedbirler alma zorunluluğu getirir.

3. KYB'nin erken dönemde küre hassas olduğu çeşitli araştırmacılarca ortaya konulmuştur. Küre hassasiyet puzolanik aktivite gösteren toz maddelerin kullanılması halinde daha baskındır. KYB'nin en azından 7 güne kadar kür edilmesi tavsiye edilmektedir. Kür edilmemesi halinde sıcak havalarda plastik büzülme çatlakları meydana gelebilir.

4. Özellikle prefabrike beton üretiminde taze betonun taşınması için geleneksel betonda kullanılan bazı sistemlerin değiştirilmesi veya modifiye edilmesi gerekmektedir. Klasik prefabrike beton üretiminde kuru kıvamlı taze beton (2-5 cm çökme değeri) yerleştireceği alana hareketli bantlarla ya da kovalar yardımıyla taşınmaktadır. KYB kullanılması halinde ise taşıyıcı bantların kullanımı mümkün değildir. Taşıma kovalarının da kapak kısımları sızdırmaz hale getirilmelidir. Aksi takdirde KYB'nin hamur kısmı taşıma sırasında sarsıntıyla açıklıktan sızarak ayrışacaktır.

5. Prefabrike beton üretiminde mevcut kalıp sistemlerinin bir kısmı KYB kullanımına uygun değildir (örneğin çatı makası gibi eğimli elemanlar). Kalıp sistemlerinin KYB kullanımına göre modifiye edilmesi gereklidir. %2'den fazla eğimli elemanlar KYB ile dökülemez.

6. Geleneksel beton üretiminde ahşap kalıp sıklıkla kullanılmaktadır. Ahşap kalıpların çakılması sırasında iki lata arasında boşluk bırakılması halinde KYB kullanıldığında hamur sızması olabilir bu nedenle kalıp işçiliğine özen gösterilmelidir. Ayrıca merdivenlerde kalıp sistemi nedeniyle KYB kullanılmamaktadır.

### 1.5. Kaynak Özetleri

Kendiliğinden Yerleşen Betonlar (KYB) ile ilgili tez konusunu ilgilendiren yayınların özetleri aşağıda verilmiştir. İncelenen yayınlar genellikle beton bileşenlerin KYB'nin tasarımı ile taze ve sertleşmiş haldeki performansı üzerindeki etkilerini içermektedir. Bununla birlikte, KYB'nin sülfat direnci ile ilgili yapılmış olan oldukça sınırlı yayınların özetleri de çıkarılmıştır. Ayrıca, tez kapsamında incelenen konuya ışık tutması beklendiği için, başta çimento türünün etkisi olmak üzere normal betonun sülfat direnci ile ilgili bazı yayınlar da incelenmiştir.

Felekoğlu (2005) çalışmasında, beton bileşenlerinden kumun fiziksel özelliklerindeki değişikliklerin KYB'nin performansı ve katkı dozajı ihtiyacı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Araştırma kapsamında 4 farklı kum (yıkamış doğal kum, yıkamış kırma kireçtaşı kumu, silt tozlu kırma kireçtaşı kumu, kil tozlu kırma kireçtaşı kumu) kullanılarak aynı yayılma çapına sahip beton karışımları hazırlanmış ve bu yayılma çaplarının sağlanması için gerekli katkı dozajları belirlenmiştir. Katkı dozajı ve kum türü dışındaki bütün değişkenler sabit tutulmuştur. Deney sonuçları aynı yayılma çapında beton üretmek için ihtiyaç duyulan katkı miktarlarının kumların fiziksel özelliklerindeki (tane boyutu dağılımı, incelik modülü, kum eşdeğeri, ince madde içeriği) değişimlerden etkilendiğini ortaya koymuştur. Aynı zamanda mekanik özelliklerde de değişiklikler söz konusudur.

Felekoğlu (2004) çalışmasında 2 farklı toz tipinin (taş tozu, uçucu kül) farklı oranlarda kullanılmasıyla hazırlanmış 32 farklı KYB'nin taze ve mekanik özellikleri incelenmiş ve toz tiplerinin etkinliklerini birbirleriyle karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda ise KYB'de kullanılan toz tipinin değişmesi ile taze betonun aynı performansı göstermesi için gerekli yayılma çapı ve V-hunisi sınır değerlerinin değiştiğini, bağıl taş tozu/uçucu kül oranı arttıkça viskozitenin düştüğünü, uçucu külün kohezif yapı oluşturmakta taş tozuna kıyasla çok daha etkili olduğunu, uçucu kül dozajı arttıkça erken dayanım azalıp ileri yaşlardaki dayanım değerlerinin arttığını, uçucu kül kullanarak taş tozuna kıyasla

düşük çimento dozajlarında ve daha düşük su/çimento oranlarında, yüksek dayanım elde etmenin mümkün olduğunu göstermiştir.

Felekoğlu ve Baradan (2004) yürüttükleri iki aşamalı bir çalışmanın ilk aşamasında, KYB üretimi için uygun malzeme tip ve miktarının seçimini yaparak optimum karışım oranlarını belirlemişlerdir. Elde edilen veriler ışığında da (ikinci aşama) hazırlanan beton karışımlarının taze halde kendiliğinden yerleşebilirlik sertleşmiş halde ise mekanik özellikleri incelenip normal beton özellikleri ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak da sabit bir çimento dozajında akışkanlaştırıcı katkı miktarı artırılıp karışım suyu azaltıldıkça, yayılma değeri belirli sınırlar arasında kalırken viskozitenin hızla arttığı; sabit bir çimento dozajı ve agrega gradasyonunda su/toz oranının artışıyla aynı anda katkı dozajının azaltılması durumunda ise taze betonun donatılar arasından geçiş yeteneğini artırdığı gözlenmiştir.

Sağlam ve Özkul (2006) ise faktöriyel analiz yöntemi kullanılarak çimento hamuru, harç ve beton bileşenlerinin reolojik özelliklere etkilerini araştırılmışlardır. Su/bağlayıcı, mineral katkı/bağlayıcı, kimyasal katkı/bağlayıcı ve kum/bağlayıcı oranları değişken olarak seçilmiştir. Reolojik parametreler olarak ise çökme-yayılma, viskozite ve kayma eşiği değerleri ölçülmüştür. Çalışmada uçucu kül ve silis dumanı, normal Portland çimentosu ile yer değiştirerek kullanılmıştır. Yapılan faktöriyel analiz sonunda reolojik özellikleri anlamlı olarak etkileyen bileşim parametrelerinin belirlendiği çalışmada varılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1- Süperakışkanlaştırıcı katkılı çimento hamuru ve harç karışımlarının Bingham cismi gibi davranmasına karşılık, beton karışımlarında kayma eşiğinin sifıra yakın değerler aldığı ve bu nedenle yaklaşık olarak Newton cismi gibi davrandığı görülmüştür. Yayılma alan oranları 5-6 değerinden büyük olan beton karışımlarının pratik olarak Newton cismi olarak kabul edileceği belirtilmiştir.

2- Çimento hamurları, harçlar ve betonlarda çökme-yayılma, viskozite ve kayma eşiği arasında ilişkiler olduğu tespit edilmiştir. Uçucu kül yerine silis dumanı kullanımının ise

çimento hamurlarında viskoziteyi arttırmasına karşın harç ve betonda viskoziteyi düşüren bir etki gözlenmiştir. Kayma eşikleri karşılaştırıldığında ise silis dumanlı çimento hamurlarının uçucu küllülere göre daha büyük değerler aldığı gözlenirken, harçlarda durum değişmiş ve silis dumanlı karışımların kayma eşiklerinin daha düşük kaldığı belirlenmiştir.

3- Genel olarak uçucu küllü hamurlarda en etkin bileşim parametreleri mineral katkı/bağlayıcı (M/B) ve su/bağlayıcı (W/B) iken, harçlarda ek olarak kum/bağlayıcı (S/B)'de etkili olmuştur. Uçucu küllü ve silis dumanlı betonların her ikisinde de S/B ve W/B etkin parametreler olarak öne çıkmıştır. Silis dumanı içeren betonlarda kimyasal katkı/bağlayıcı (SP/B)'nin de yayılma alan oranı ve kayma eşiği üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. “Merkezi bileşik tasarım” yöntemi ile tasarlanan deney verilerine uygulanan “Response surface” yönteminin kendiliğinden yerleşen çimento hamuru, harç ve betonların reolojik parametrelerinin tahmininde başarı ile uygulanabileceği görülmüştür.

Türkmen ve Kantarcı (2005) çalışmalarında farklı kür şartlarında normal agrega (NA) ve genleştirilmiş perlit agregası (EPA) ile üretilen KYB'lerin basınç mukavemeti ve geçirimsizlik katsayılarını zamana bağlı olarak belirlemişlerdir. Üretilen beton örnekleri  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'deki kirece doymuş suda (CC1), kuru olarak dış ortamda (CC2), 14 gün dış ortamda günde üç kez sulama ve daha sonra laboratuvar ortamında (CC3), 14 gün ıslak çuval altında daha sonra laboratuvar ortamında (CC4) ve %100 nemli ortamda (CC5) kür edilmiştir. Sonuç olarak da EPA katkılı betonun basınç mukavemetinin, CC2 kür ortamında kür edilen EPA5, EPA10 ve EPA15 katkılı numuneler hariç, NA'lı betonlardan daha düşük çıktığını belirlemişlerdir. En yüksek basınç mukavemeti ise CC1 ortamında kür edilen beton numunelerden elde edilmiştir. CC2 ortamında kür edilen betonların basınç mukavemeti EPA5, EPA10 ve EPA15 karışım oranlarında EPA0 karışım oranına göre bir miktar artmıştır. CC1 ortamında kür edilen beton örneklerin geçirimsizlik katsayısı, 28, 56, 90, 120 ve 150 günlük kür süreleri boyunca, diğer kür ortamlarından daha fazla azalmıştır. En düşük geçirimsizlik katsayısı değerinin

CC1 ortamında elde edildiği bu çalışmada EPA oranı arttıkça numunelerin geçirimsizlik katsayılarının arttığı bu karşın kuru birim ağırlıklarının ise azaldığı tespit edilmiştir.

Türk vd (2006) ise KYB ve normal betonunun mühendislik özelliklerini (basınç dayanımı, çekme dayanımı ve ultrases hızı) incelemek için yürütülen bir çalışmayı rapor etmişlerdir. Her iki beton türüne ait numuneler de 3, 7, 14 ve 28 gün olmak üzere üç farklı küre (su, naylon ve hava) maruz bırakılmışlar. Sonuçta bütün mühendislik özelliklerinde KYB numunelerin normal betondan daha iyi performans gösterdiği ortaya çıkmıştır. KYB'nin normal beton ile karşılaştırıldığında 7 günlük kür süreleri sonunda çekme mukavemeti değerleri arasında çok az fark olduğu, ancak daha sonraki yaşlarda KYB numunelerinin kontrol betonuna göre daha yüksek çekme mukavemetine ulaştığı gözlenmiştir. Ayrıca, bütün test metodu ve beton yaşları için suda kür edilen beton numunelerinin daha yüksek mekaniksel özelliklere sahip olduğu ve bunu sırasıyla naylon içinde ve havada bekletilen numunelerin takip ettiği gözlenmiştir.

Yapılan literatür taramasında KYB'lerin sülfat dirençleri ile ilgili oldukça sınırlı sayıda (2 adet) yayına rastlanmıştır. Bunlardan Persson (2003) tarafından yapılan çalışmada KYB ile normal betonun sülfat direncini karşılaştırmıştır. Bu maksat için 40'tan fazla beton silindiri sodyum sülfat solüsyonuna, deniz suyuna ve damıtılmış suya 900 gün civarında maruz bırakılmıştır. Test başlangıcında beton yaşlarının 28 ve 90 günlük olduğu bu çalışmada ağırlık değişimleri ve elastisite modülleri ölçülmüştür. Sodyum sülfat solüsyonu içinde kür edildiği zaman KYB'de normal betondan daha fazla kütle kaybı olmuştur. Araştırmacı bunun nedenini KYB'nin içindeki kireçtaşı fillerine bağlamaktadır. Deniz suyu ve damıtılmış su içinde bekleyenlerin ağırlıklarında ise pek fazla düşüş olmamıştır. Her iki beton türünde de (normal beton ve KYB) elastisite modüllerinde azalma olmamıştır.

Bundan sonra verilen özetler normal betonların sülfat direnci üzerine yapılmış olan çalışmalardan alınmıştır.



Irassar *et al.* (2000) yaptıkları çalışmada sertleşmiş çimento pastasındaki erken yaşta oluşan CH'in miktarındaki değişiklikler gibi bazı parametreleri sülfatlı ortam etkisinde incelenmiştir. Çalışmada oldukça farklı C<sub>3</sub>S içerikli iki farklı Tip V çimentosu ve bunlara belirli oranlarda doğal puzolan veya kireçtaşı filleri karıştırılarak oluşturulmuş çimento hamurları kullanılmıştır. Kontrollü pH ortamındaki sodyum sülfat solüsyonunda 1 yıla kadar daldırılmış harcın genleşme, eğilme ve basınç mukavemeti değerleri ölçülmüştür. Çalışmada yüksek C<sub>3</sub>S içerikli Portland çimentosunun sülfat direnci, düşük C<sub>3</sub>S içerikli Portland çimentosundan oldukça zayıf olduğu görülmüştür. Karışımlara düşük C<sub>3</sub>A çimentosunun performansı kireçtaşı fillerinin %20'sinin eklenmesiyle gerilemiş fakat doğal puzolanın eklenmesi maksimum sülfat direncini vermiştir. Bu davranış çimento pastasının içindeki CH ile sülfat iyonları arasında gerçekleşen ve sülfat saldırısının etkin bir mekanizmasını üreten reaksiyonu açıklayabilir.

Higgins *et al.* (2003) yaptıkları uzun vadeli bir laboratuvar çalışmasında çimento tipi, agrega tipi ve kür şartlarının TSA (Thaumasite form of Sulfate Attack= sülfat etkisi ile oluşan tomasit)'ya etkisini araştırmışlardır. Bağlayıcı olarak %30 PC+%70 GGBS kombinasyonu, SRPC (Sülfata Dayanıklı Çimento) ve PC seçilmiştir. Bunlar karbonat içeren ve içermeyen agregalarla kombine edilmiştir. Üretilen küp numuneler 5°C ve 20°C'deki sülfat solüsyonunun 4 farklı derecesinde saklanmışlardır. Çalışmanın sonunda karbonat agregalarıyla yapılmış olan ve 5°C' de sülfat solüsyonuna daldırılmış olan PC ve SRPC betonlarının birçoğunda TSA'dan kaynaklanan bozulmanın olduğu gözlenmiştir. SRPC'li betonların direnci PC'den daha iyi değildir.%30 PC+%70 GGBS ile üretilen betonlar TSA' ya yüksek direnç göstermiştir ve karışımdaki karbonatın varlığı onların genel sülfat direncini geliştirmiştir. Ayrıca ilk hava kürünün hem TSA hem de geleneksel sülfat saldırısına karşı faydalı olduğu kanıtlanmıştır.

Tsivilis *et al.* (2007)'nin çalışması ise düşük sıcaklıklarda sülfat iyonlarının varlığının çimento hamurunun davranışına etkisini incelemeye yöneliktir. Çimento hamuru örnekleri %30 ve %15 kireçtaşı içeriğine sahip Portland çimentoları kullanılarak yapılmıştır. %1,8 MgSO<sub>4</sub> solüsyonda 5°C'de bir yıl saklanan numuneler üzerinde görsel

denetleme, kütle ölçümleri ve ultrasonik hız ölçümleri yapılmıştır. Sonuçta yüksek kireçtaşı içeriğine sahip olanlarda sülfat saldırısının Tomasit oluşumuna hassas olduğu ve bozulmanın daha sert olduğu görülmüştür.

Torres *et al.* (2003) tarafından yapılan çalışmada ise kireçtaşı içeren Portland çimentosu ile yapılan harç prizmaları 5°C'de %1,8 MgSO<sub>4</sub> solüsyonunda ve havada 5 yılı aşkın süre kür edilmiştir. Örneklerdeki kireçtaşı içeriği %0,2 den %35'e kadar değişmiştir. Fakat kireçtaşı tozu ilavesiyle çimento-su oranı sabit tutulmuştur. 5 yıl sonunda numunelerin genel durumları, XRD sonuçları, kızılötesi spektroskopisi ve SEM'den alınan görüntüler rapor edilmiştir. MgSO<sub>4</sub>'da bekletilen numuneler bozulmanın çok net işaretlerini göstermişlerdir. Özellikle kireçtaşı içerenlerde bu keskinlik artmıştır. %5'i kireçtaşı olan prizmalar kontrol grubuyla (normal Portland çimentolu numuneler) karşılaştırıldığında oldukça ciddi zarar görmüştür ki bu da Tomasit oluştuğunun göstergesi kabul edilmiştir.

Crammond (2002)'nin yaptığı çalışma ise sülfat kaynaklı tomasit oluşumunun kendini gösterdiği modern yapılarda rapor edilen bozulma olayının tekrar gözden geçirilmesini içerir. Çalışma sonucunda tomasitin, kireç-alçı sıvası içeren bina sistemlerinin geniş çeşitliliği içinde, sülfatlı mineraller kullanılmış tuğla yapılarda, temel tabakasında, kanalizasyon borularında, tünellerde ve toprak dolgusu olarak yüksek fırın cürufu kullanılan yerlerde çeşitli derecelerde oluşabileceği belirtilmektedir.

Khatri *et al.* (1997) yaptıkları çalışmada sülfat atağında permeabilitenin rolünü araştırmışlardır. %5 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (~33000 ppm) çözeltisinde beş tip bağlayıcı ile hazırlanmış normal beton numunelerinin sülfat atağına karşı direnci şişme ve kabarmanın tespit edilmesiyle ölçülmüştür. Bu bağlayıcılar sırasıyla Portland Çimentosu (PC), Yüksek Cüruf Çimentosu (HSC), Sülfata Dayanıklı Çimento (SRC), PC+%7 silis dumanı (SF) ve HSC+%7 SF' dir. Sülfat atağından dolayı genişleyen beton örneklerinin permeabilitesi birbirleri ile karşılaştırılarak permeabilitenin sülfat direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak da hem permeabilite hem de bağlayıcı tipi sülfat atağında önemli rol oynamasına rağmen betonların performanslarının sadece

permeabilite veya bağlayıcının kimyasal direnci ile açıklanamayacağı ancak tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır. Düşük  $C_3A$  ve düşük  $C_3S$  içerikli çimentolar en az genleşme, yüksek  $C_3A$  ve yüksek  $C_3S$  içeriği olan çimentolarla hazırlanan betonlarda ise maksimum genleşme görülmüştür. Bağlayıcı türüne göre permeabilite sıralaması ise aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$(HSC+SF) < HSC = (PC+SF) < SRC < PC$$

Gjory (1971) ise 1 yıl ile 30 yıl arasında değişen sürelerde yaptığı çalışmasında su/çimento oranı 0,55-0,65 arasında değişen ve 18 değişik çimento türü ile ürettiği 2500 beton bloğunu deniz suyunda saklamıştır. Sonuçta Yüksek Alümina Çimentosu, Süper Sülfat Çimentosu ve Yüksek Fırın Cürufu Portland Çimentolarının deniz suyundan hiç etkilenmediği buna karşın  $C_3A$  oranı %7- %11 arasında değişen Portland çimentolarının şiddetli bir şekilde hasara uğradığı saptanmıştır.

Al-Amoudi (1997) yaptığı çalışmada Tip I, TipV, uçucu kül (%20), silis dumanı (%10) ve yüksek fırın cürufu (%60 ve %70) çimentoları ile su/çimento oranı 0,50 olan beton numuneler hazırlamıştır. 14 gün boyunca içilebilir suda kür edilen numuneler laboratuarda hava kurusu haline getirildikten sonra ağırlıkları belirlenmiş daha sonra da konsantrasyonu yılda dört-beş kez ayarlanan  $Na_2SO_4$  ve  $MgSO_4$  çözeltilerinde 44 ay boyunca saklanmıştır.

Deneylerin sonucunda zengin  $MgSO_4$  içeren ortamlarda katkılı çimentolarla hazırlanan betonların normal çimentolarla hazırlananlarla kıyaslandığında ileri derecede bozulduğu görülmüştür. Silis dumanlı betonların performansının uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren betonlardan daha iyi olduğu en kötü performansı ise yüksek fırın cürufu betonların gösterdiği tespit edilmiştir. Tüm sülfatlı ortamlarda sülfat atağı ve donatı korozyonu açısından içerdiği  $C_3A$  yüzdesi %3,5-%8,5 arasında değişen normal Portland çimentoları arasında önemli bir fark olmadığı görülmüştür. Ayrıca,  $Na_2SO_4$  içeren ortamlarda silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ile yapılan katkılı çimentolu betonların

dayanımlarının azalmasına rağmen genişleme açısından normal çimentolardan daha iyi performans gösterdiği tesbit edilmiştir.

Brown (1981) ise pH'ın betondaki genişleme ve dayanım üzerindeki etkisini belirlemek için yaptığı çalışmada %10 oranında C<sub>3</sub>A içeren Tip I Portland Çimentosu ile üretilen beton numunelerini pH'ları 6, 10, 11.5 olan kontrollü ve pH kontrolsüz Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde saklamıştır. Sonuçta sülfat atağının etki hızının ve betonun maksimum dayanıma ulaşmasının pH'a güçlü bir şekilde bağlı olduğu ancak betonun dayanım kaybı oranının nispeten pH'tan bağımsız olduğunu belirtilmiştir. Kontrollü pH'ların sülfat atağı hızını arttırdığı ve daha kısa sürede etki ettiğini, pH'ların artması ile de etki şiddetinin azaldığı ve aynı etki için daha uzun süre gerektiği sonucuna varılmıştır.

### **1.5. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı**

Enerji gerektirmeden yerleşebilme ve daha az boşluklu yapı oluşumuna yol açma gibi geleneksel betonlara göre birçok avantaja sahip olduğu için kullanımı her geçen gün artan Kendiliğinden Yerleşen Betonlar (KYB) üzerinde yapılan çalışmalar İnşaat Mühendisliği'nde ilgi toplamaya devam etmektedir. Kısa ve orta vadede normal betonların yerini alma olasılığı olan bu tür betonların çeşitli mühendislik özelliklerinin araştırılması beton teknolojisi açısından önemlidir.

KYB ile ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde tasarım kriterleri, taze beton davranışları, deney yöntemleri, klasik mekanik özelliklerin normal betonlarla karşılaştırılması ya da uygulama örnekleri üzerinde yoğunlaştığı tespit edilmiş bulunmaktadır. Hâlbuki salt beton olarak imal edilmiş ya da betonarmede kullanılmış olsun birçok yapı ve/veya elamanda görülen hasarın nedeni, üzerindeki yükler değil, servis ömrü boyunca maruz kaldığı çevresel etkilerdir. Öyleki bu durum beton teknolojisinde performansa dayalı tasarım yapma zorunluluğuna yol açmıştır. Bu çevresel etkiler içinde sülfat içeren ortamlar da bulunmaktadır. Doğal zeminlerde, bataklık ve endüstri atığı dolgu zeminlerde SO<sub>4</sub> iyonu bulunabileceği gibi SO<sub>3</sub> gazı ile kirlenmiş endüstriyel bölgelerin havası da betonda sülfat etkisi yapabilmektedir. Bu

nedenle bu türden zeminler ya da bölgelerde yapılacak olan yapılarda kullanılacak KYB'lerin sülfat dirençlerinin de araştırılması gerekir. Kaldı ki sadece KYB değil normal betonların bile sülfata karşı dirençlerinin daha ayrıntılı araştırılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Nitekim, beton konusunda araştırmaları ile öne çıkmış olan bilim insanı Adam Neville betonun sülfat direncinin henüz tam olarak anlaşılmadığını ve “dünyanın bu konuda kafasının karışık olduğunu” ifade etmektedir (Neville 2004).

Betonun için de en fazla hacmi işgal eden agrega çeşitli nedenlerden dolayı farklılık gösterir. Bunların içinde üretim yapılan bölgeye yakın agrega ocaklarının özellikleri belirleyici bir parametre olmakla birlikte dere malzemesi olması ya da kırmataş olarak kullanılıp kullanılmaması da önemlidir. KYB söz konusu olunca normal ya da kırmataş olmasının onun taze ve sertleşmiş haldeki davranışına ne gibi etkisinin olduğunu araştırmak gerekir. Ayrıca jeolojik köken, dolayısı ile özgül ağırlık ve su emme değerlerinin farklı olması durumunda, KYB davranışının nasıl değişeceğini belirlemek gerekir.

Benzer durum çimento içinde geçerlidir. Kolay ve ekonomik temin ya da durabilite kaygısı gibi nedenlerden dolayı birçok zaman beton teknolojisinde farklı tür çimentolar kullanılmaktadır. Bu çimentolar ile üretilen KYB'lerin davranışlarını incelemek de önem arz etmektedir.

Bütün bu hususlar göz önünde bulundurularak farklı tür agrega ve çimento kullanılarak üretilen KYB'lerin hem taze haldeki temel özelliklerinin (viskozite, akıcılık, geçme yeteneği ve ayrışma direnci) incelenmesi hem de sülfat direncinin araştırılması tez konusu olarak belirlenmiştir. Yapılan literatür taramasında KYB'nin sülfat direnci üzerine oldukça sınırlı sayıda yayına rastlanması da bu konunun tez konusu olarak seçilmesinde etken olmuştur.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

Beton teknolojisinde sülfatlı ortam tanımı servis hayatının büyük bir bölümünü deniz suyu, yer altı suyu veya kanalizasyon suyu gibi ortamlarda geçiren betonlar için yapılmaktadır. Sülfatlı ortamın şiddeti ise sulu ortamdaki sülfat iyonu konsantrasyonunun suyun ağırlığına yüzdesi veya toplam su miktarındaki ‘‘milyonda miktar (ppm)’’ cinsinden ifade edilmesiyle verilmektedir (Haktanır vd 2006). TS 3440 (Anonim 1982)’de 3000 ppm olarak belirtilen sülfatlı ortam sınırları, ACI 201.2R-77 (Anonymous 1977) ve ACI 225R-85 (Anonymous 1985)’de, 150 ppm-1500 ppm arası ‘‘orta’’, 1500 ppm-10000 ppm arası ‘‘şiddetli’’, 10000 ppm üzeri ‘‘çok şiddetli’’ olarak tanımlanmaktadır.

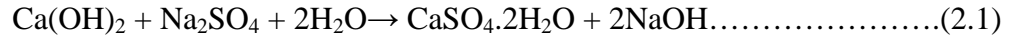
Yukarıda belirtilen nicel değerlerin yanı sıra, sülfürik asit veya magnezyum, sodyum, kalsiyum gibi tuzların erimesinden kaynaklanan sülfat iyonları da betonda sülfat tahribatını etkiler. Ancak, asidik tahribatın sülfat iyonu tahribatından daha şiddetli olduğu söylenebilir (Neville 1986; Zivica and Bajza 2001). Örneğin, sülfürik asitli bir su betonda  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$  veya  $\text{MgSO}_4$  gibi bir tuzun erimesinden daha şiddetli bir kimyasal tahribat yapacaktır (Santhanam *et al.* 2001). Sülfat iyonu tahribatından farklı olarak, herhangi bir asitin suda erimesiyle ortaya çıkan  $\text{H}^+$  iyonunun da genişlemeye yol açıcı ve parçalayıcı etkisi bulunmaktadır (Neville 1986; Zivica and Bajza 2001).

Evsel ve/veya endüstriyel atıkların su akıtma tesisleri, betondan yapılan kanalizasyon sistemleri, beton sulama kanalları, barajların savak aksamları, köprü ayakları, liman yapılarının betonları servis ömürleri boyunca su ile temasta olacaklarından, suda eriyik halde bulunabilen sülfat iyonunun ( $\text{SO}_4$ ) kimyasal tahribatından dolayı, beklenen ekonomik ömürlerini tamamlayamadan parçalanabilirler. Sülfatlı jeolojik tabakalar üzerinde yapılmış olan betonarme temel yapılarında da sülfat tahribatı görülebilmektedir. Zira, toprak tabakalarında bulunan sülfat, sızan yağmur suları veya seviyesi yüksek yer altı suyu ile eriyip betona zarar verebilmektedir (Bekmezci 2005).

Bilindiği üzere,  $SO_4$  iyonu, çimentolarda bulunan trikalsiyumalüminatın ( $C_3A$ ) hidratasyonundan oluşan kalsiyumalüminathidrat bileşeni ile yaptığı kimyasal tepkime sonucu, genleşen jips ve yine genleşen candlot tuzu (etrenjit) oluşturarak, betonun zamanla parçalanmasına neden olmaktadır (Anonim 1982; Neville 1986; Uğurlu 1996).

Sertleşmiş betonun içerisine sızan sularda sodyum sülfat ( $Na_2SO_4$ ) gibi sülfatların bulunması betonda iki aşamalı reaksiyonun yer almasına neden olmaktadır. Bu reaksiyonlar aşağıda verilmiştir (Akman 1992; Kılınç ve Uyan 2003; Akman 2003);

1. Sertleşmiş çimentonun bünyesinde hidratasyon ürünü olarak yer almakta olan kalsiyum hidroksit ( $Ca(OH)_2$ ) ile sülfatlar arasındaki reaksiyonlar sonucunda alçıtaşı oluşmasına yol açan reaksiyonlar;



Bu reaksiyonda sülfat tuzunun katyon türüne bağlı olarak alçıtaşı ile birlikte teşekkül eden reaksiyon ürünü  $NaOH$  gibi suda eriyen veya  $Mg(OH)_2$  gibi suda erimeyen tür de olabilir. Yan ürünün eriyebilirliğine bağlı olarak korozyon daha şiddetli olabilir. Örneğin, soydun sülfat magnezyum sülfata oranla sülfat etkisi açısından daha zararlıdır.

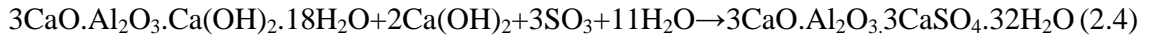
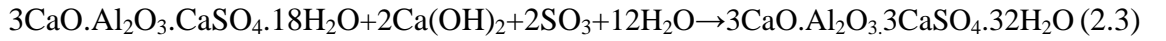
Yukarıdaki reaksiyon sonucu oluşan alçıtaşı ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) ile meydana gelen birinci aşamada sülfat etkisinde hacim artışı nispeten azdır. Ancak, alçıtaşının suda eriyebilmesi yönünden de korozyona neden olduğu unutulmamalıdır.

2. Sülfatların asıl önemli etkisi  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  veya suda erimiş halde bulunan  $CaSO_4$  ile  $C_3A$ 'nın reaksiyona girmesiyle ortaya çıkar. Bunun sonucunda oluşan yüksek sülfatlı sülfö-alüminat tuz (etrenjit) içerdiği kristal suyunun fazlalığı nedeniyle büyük hacim artışı oluşturur. Kristalleşen katı haldeki tuz betonun boşluk çeperlerinde büyük basınç gerilmeleri meydana getirir ve önce çatlaklar ileri yaşlarda da ayrışma ve yumuşamalar görülür.

Etrenjitin oluşabilmesi için çimentodaki hidrate  $C_3A$ 'nın bir bölümünün önceden karmaşık bir yapı gösteren monosülfoalüminata ( $3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.18H_2O$ ) dönüşmüş olması lazımdır. Bu dönüşüm ise aşağıdaki reaksiyon sonucu gerçekleşir:



Esasen üretim esnasında klinkere katılan alçıtaşı bu işlevi yerine getirmektedir. Çimentoda  $C_3A$  içeriğinin %6'yı aşması durumunda  $Ca(OH)_2$  içeren bir diğer karmaşık ürün daha oluşur:  $3CaO.Al_2O_3.Ca(OH)_2.18H_2O$ .  $C_3A$ 'ların oluşturduğu bu iki ürün de, aşağıdaki reaksiyonlar gereğince, sülfat iyonları ve kireçle reaksiyona girerek etrenjite dönüşürler:



Özellikle son ikisi olmak üzere bu reaksiyonlarda kirecin ( $Ca(OH)_2$ ) gerekliliği dikkat çekmektedir.

Neville (1986) ve Cohen *et al.*(1988) da sülfatlı ortamlarda görülen hasar mekanizmasını yukarıdaki gibi açıklanmaktadır. Bu araştırmacılar da sülfatlı çözeltilerdeki sülfat iyonlarının, çimentonun hidratasyon ürünü olan CH ile reaksiyonu sonucu jipsin ( $CSH_2$ ) meydana geldiğini ancak bu jipsin betondaki hacim artışına ve yumuşamaya olan etkisinin sınırlı olduğunu ve her zaman zararlı olmadığını bildirmişlerdir. Ancak oluşan bu jips çimentoda bulunan  $C_3A$  ve bunun hidratasyon ürünü olan  $C_3AH_6$ ,  $C_4AH_{13}$ ,  $C_4ASH_{12-18}$  ile Candlot tuzu ( $C_6AS_3H_{32}$ ) oluşturur. Candlot tuzu doğal mineral olan etrenjite benzer bir yapıya sahiptir ve içerdiği 32 molekül kristal suyu nedeni ile hacim artışı meydana getirir. Oluşan bu hacim artışları nedeniyle betonda çatlaklar oluşur, bu çatlaklar malzemenin performansını düşürür, kırılmalar ve parçalanmalar görülür.



Sülfat hasarının sadece yukarıda belirtilen şekilde gelişmediği son 15-20 yıldır tartışılmaktadır. Beton üretiminde kullanılan katkılardan gelen ve çimento kompozisyonundaki farklılıklar sülfat etkisinin başka koşullarda ve biçimlerde de meydana gelebileceğini göstermiştir. Bu oluşumlardan biri gecikmiş etrenjit oluşumu (Delayed Ettringite Formation, DEF ) diğeri Tomasit (Thaumasite) oluşumudur. DEF çimentonun yüksek oranda içerdiği çözünen sülfat iyonlarının uzun süre ve ıslanma-kuruma sonunda jel görünümlü etrenjite dönüşmesidir. Bu formasyon için betonun sülfatlı sularla temas etmesine gerek yoktur. Tomasit oluşumunda ise betonun sülfatlı bir çevrede bulunması gerekir. Olay, sülfata dayanıklılığı sağlamak amacıyla düşük oranda  $C_3A$  içeren çimentolarda da gözlenmiştir (Anonim 2009).

Sülfattan etkilenmiş beton karakteristik beyazımsı bir görünüm kazanır. Bunun nedeni, trikalsiyum sülföalüminatın formasyonu olan sülfat tesirinin var oluşudur. Hasarlar genellikle köşe ve kenarlarda başlar, betonun çatlama ve pullanmasıyla devam eder (Arslan 2001).

Betonun geçirgenliği, sülfatlı suların beton içerisine difüzyonu, kapilarite ve özellikle kütle transferi reaksiyon hızını etkilediğinden beton içerisindeki sülfat konsantrasyonunu tespit etmek güçtür. Sülfatlı sularla sürekli ıslanıp kuruyan ve zaman içerisinde bu olaya devamlı maruz kalan beton boşlukları önce sülfatlı su ile dolar bu su çekildiğinde ise boşlukta bulunan suyun buharlaşması sonucu boşluklardaki sülfat konsantrasyonu yükselir ve beton çok şiddetli korozyona uğrar (Yalçın 1975).

## **2. 1. Sülfatın Bulunduğu Ortamlar**

Doğal zeminlerde, bataklık ve endüstri atığı dolgu zeminlerde genel olarak trias, jura, jips ve anhidritli katmanlara rastlanır. Magnezyum sülfat ve sodyum sülfat gibi kolay çözülebilen tuz yataklarının civarındaki zeminlerde de  $SO_4$  iyonu bulunabilir. Ayrıca jips içeren katmanlardaki zemin suları fazla miktarda  $CaSO_4$  içerir. Böyle zeminlere oturmuş betonların burada bulunan su ile teması sonucu betonda tahribatlar oluşur. Betona sülfat iyonlarının zarar vermesi için ortamda suyun bulunması gereklidir. Bu

sebepten dolayı, bu zeminlerde bulunan beton yapılar suya karşı korunduğu müddetçe sülfat korozyonu söz konusu olamaz (Uğurlu 1996; Anonim 1982).

SO<sub>3</sub> gazı ile kirlenmiş endüstriyel bölge havası betonda sülfat etkisi yapabileceği gibi betonun bünyesinde bulunan serbest Ca(OH)<sub>2</sub> ile birleşerek alçı taşına dönüşebilir. Alçı taşı da hacim artışına neden olduğundan hasar oluşturur. Ayrıca SO<sub>3</sub> gazının havanın nemiyle birleşip sülfürik aside dönüşmesi betonda zararlı etki oluşturabilir. Bu durumların önlenmesi için beton uygun bir madde ile yalıtılmalıdır (Uğurlu 1996).

Beton yapısı gereği belli ölçüde geçirgen olduğundan temas suyunda betona zarar verecek nitelikte kirliliğin olmaması gerekir. Doğadaki suların zararlı etkinlik dereceleri incelenen özellik ve madde bakımından TS 3440 (Anonim 1982)'de verilen sınır değerler göz önüne alınarak tayin edilir (Çizelge 2.1). Bu değerler durgun ve yavaş akan, büyük miktarlarda bulunan ve beton ile doğrudan temas halinde bulunan sular için geçerlidir.

**Çizelge 2.1.** Suların zararlı etkinlik dereceleri için sınır değerler (Anonim 1982)

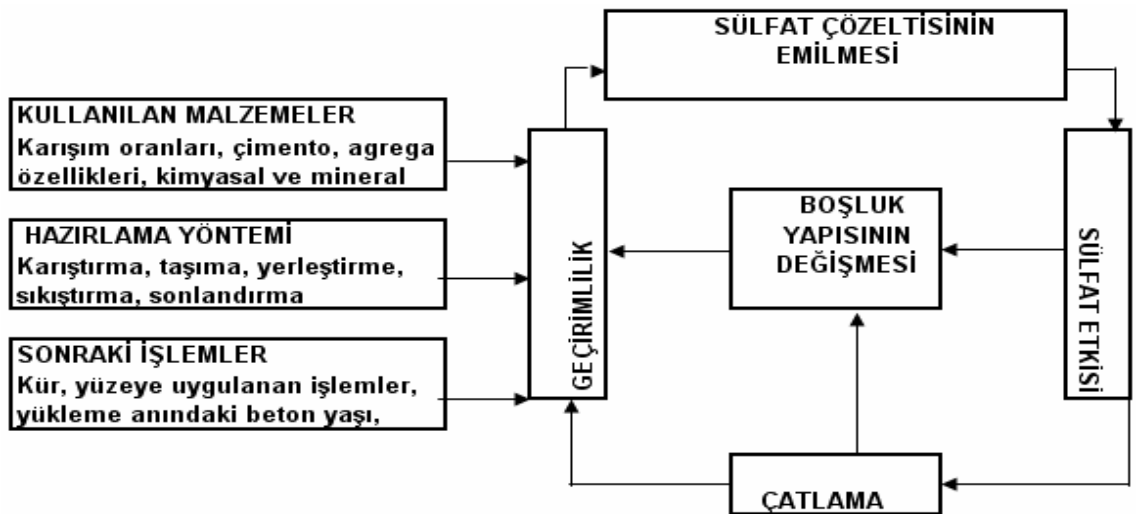
İncelenen Özellik	Zararlı Etkinlik Dereceleri		
	Zayıf	Kuvvetli	Çok Kuvvetli
pH değeri	6,5-5,5	5,5-4,5	< 4,5
Kireç çözücü (CO <sub>2</sub> ) mg/l	15-30	30-60	> 60
Amonyum (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) mg/l	15-30	30-60	> 60
Magnezyum (Mg <sup>2+</sup> ) mg/l	100-300	300-1500	> 1500
Sülfat (SO <sub>4</sub> ) mg/l	200-600	600-3000	> 3000

## 2.2. Reaksiyon Gelişimini Etkileyen Faktörler

Sülfat reaksiyonunun gelişimini doğrudan etkileyen parametreler; etkilenme koşulları (SO<sub>4</sub> içeriği, ortam koşulları), betonun geçirimsizliği (zararlı madde taşınımı), betonun yapısı (çimentonun kimyasal yapısı) ve suyun varlığı olarak sıralanabilir (Baradan vd 2002).

Diğer tüm dayanıklılık problemlerinde olduğu gibi betonun sülfata dayanıklılığı da büyük oranda geçirimliliğe bağlıdır. Betonun geçirimliliğini etkileyen malzeme özellikleri, karışım oranları, çatlak durumu, taze betonun sıkıştırılması, kürü gibi parametreler aslında sülfata dayanıklılığını da dolaylı olarak etkilemektedir. Şekil 2.1’de betonun geçirimliliği ile sülfata dayanıklılığı arasındaki ilişki şematik olarak gösterilmiştir. Bu şekilde dikkat çeken en önemli nokta sülfat etkisi ile betonun geçirimliliği arasındaki döngünün varlığıdır. Bir başka deyişle, sülfat etkisine maruz kalan betonun boşluk yapısı değişmekte, gözenekliliği artmakta, çatlaklı bir yapı oluşmaktadır. Bu durum, betonun geçirimliliğinin artmasını dolayısıyla yıpranma sürecinin kendi kendini hızlandırma özelliğini göstermektedir (Baradan vd 2002; Taşdemir ve Akyüz 1999).

Çimentonun kimyasal yapısı, özellikle  $C_3A$  içeriği betonun sülfata dayanıklılığında önemli bir parametredir. Bu nedenle, ASTM standartları  $C_3A$  içeriği %8 ve altında olan çimentoları sülfata orta derecede dayanıklı, %5 ve altında olan çimentoları ise sülfata yüksek seviyede dayanıklı olarak tanımlamaktadır. Avrupa’da ise %3  $C_3A$  içeriği birçok ülke tarafından üst sınır kabul edilmektedir. Normal Portland Çimentolarında  $C_3A$  %8-11 arasında değiştiğinden, bu tip çimentoları sülfat etkisinde kalan yapılarda kullanmak doğru değildir (Baradan vd 2002).



Şekil 2.1. Betonun sülfat dayanıklılığı ile geçirimliliği arasındaki ilişki (Baradan vd 2002)

Son yıllarda yapılan araştırmalar katkılı çimentoların sülfata dayanıklılık konusunda Portland çimentolarına kıyasla üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Bu tip çimentolar içerisindeki puzolanlar bağlayıcılık kazanabilmek için, çimentodaki kalsiyum-silikatlı anabileşenlerin hidratasyonu sonucunda oluşmuş olan kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek yeni kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jelleri üretmektedirler. Böylece Portland-puzolan tipi çimentolarla yapılan betonun içerisinde, puzolan içermeyen çimentolarla yapılan betonun içerisinde bulunan kalsiyum hidroksitten daha az kalsiyum hidroksit bulunmaktadır. Portland-puzolan tipi çimentolarla yapılan betonların içerisinde, sonradan sülfat hücumu ile alçıtaşı oluşması ve genleşmelere yol açan reaksiyonlara devam etmesi imkanı daha düşüktür (Erdoğan 2003).

zkan (1992)'ye göre puzolanlı çimentonun agresif ve özellikle sülfatlı ve asitli suya karşı dayanımı betondaki gözeneklerin SiO<sub>2</sub>, aliminyumhidroksit ve bazı durumlarda demiroksit jelleri ile tıkanmasından ileri gelmektedir. Bu jel, gözenekleri tıkayarak bir yalıtım görevi görür. Bu yalıtımda betonun dış etkilere karşı dayanımını arttırır. Oluşan jeller arasında SiO<sub>2</sub> jeli en çok paya sahip olup, bu jel diğerlerine göre agresif iyonlara karşı en az geçirgenliğe sahiptir.

Alüminli imentolar aslında sülfata dayanıklılık açısından geliştirilmişlerdir. Bu tip imentolar Ca(OH)<sub>2</sub> içermemeleri ve hidratasyon sırasında oluşan inert alümin jelinin koruyucu etkisi sonucu sülfata çok dayanıklıdır. Ancak asidik karakterdeki alüminli çimentolar günümüzde bu amaçla tüketilmemektedir (Baradan vd 2002).

Uçucu kül, silika tozu veya doğal puzolan gibi mineral katkıların da bu konuda önemli yararları vardır. Çimento harcındaki serbest kirecin puzolanlarla reaksiyona girip bağlanması dayanıklılığı arttıran bir unsurdur (Baradan vd 2002).

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Agregal

Çalışmada iri agregal olarak en büyük tane çapı 16 mm olan kırmataş kalkerler (beyaz ve gri), kırmataş bazaltlar (farklı özgül ağırlık ve su emme değerli) ve yuvarlak agregal (dere malzemesi) kullanılmıştır. Kum olarak ise doğal dere kumu kullanılmıştır. Harcın agregaları daha iyi sarmasını sağlamak için toz madde olarak parçacık boyutu 125 mikronun altında olan beyaz kalker filleri kullanılmıştır.

Tamamı Erzurum civarından temin edilen agregalardan laboratuarda TS 707 (Anonim 1980a)'de belirtilen çeyrekleme yöntemi ile örnekler alınmıştır. Bu şekilde elde edilen numuneler üzerinde TS EN 1097-6 (Anonim 2002c)'e göre ayrı ayrı özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılmıştır. Fillerin özgül ağırlığı ise TS EN 1097-7 (Anonim 2001)'e göre bulunmuştur. Deneylerde elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Agregaların özgül ağırlık ve su emme değerleri

Agregal Tipi		Özgül Ağırlık	Su Emme (%)	Agregal Tipi		Özgül Ağırlık	Su Emme (%)
Filler		2,70	-	Normal <sup>1</sup> Agregal	4/8	2,63	2,29
Kum (0/4)		2,54	2,66		8/16		1,91
Beyaz Kalker	4/8	2,69	0,94	Gri kalker	4/8	2,71	0,82
	8/16		0,32		8/16		0,49
Bazalt 1	4/8	2,68	1,39	Bazalt 2	4/8	2,45	3,20
	8/16		1,41		8/16		3,20

<sup>1</sup> “Normal Agregal” tanımlaması tane şekline göre “yuvarlak agregal” sınıfına giren dere malzemesi anlamında yapılmış olup özgül ağırlık ya da birim ağırlık anlamında kullanılan “normal agregal” değildir. Özellikle tezin 3 ve 4. Bölümlerinde kullanılan normal agregal ile kastedilen yuvarlak agregaldir.

### 3. 1. 2. Çimento

Üretilen betonlarda; Normal Portland Çimentosu (CEM I 42.5 R), Portland Kompoze Çimento (CEM II/B-M 32.5 R), Kompoze Çimento (CEM V/A 32.5 N), Sülfata Dayanıklı Çimento (SDÇ) ve Kalsiyum Alüminatlı Çimento (AÇ) kullanılmıştır. Kalsiyum Alüminatlı Çimento TS 6271 (Anonim 1988)'e göre Sülfata Dayanıklı Çimento ise TS 10157 (Anonim 2008)'e göre üretilmiştir. Kullanılan çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Çimentoların teknik özellikleri<sup>2</sup>

	CEM I 42.5 (PÇ 42.5)	CEM II/B-M 32.5 (PKÇ 32.5)	CEM V/A 32.5 (KZÇ 32.5)	SDÇ 32.5	AÇ
<b>Kimyasal İçerikler (%)</b>					
SiO <sub>2</sub>	20,54	27,77	31,98	19,75	4,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,12	6,65	9,58	4,14	40,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,69	3,43	3,31	5,24	16,45
CaO	62,98	53,04	42,62	63,19	36,05
MgO	1,70	1,83	3,58	1,32	0,80
SO <sub>3</sub>	2,88	2,58	2,66	2,51	0,02
Kızdırma Kaybı	2,03	3,15	4,16	2,40	0,30
Ana bileşenlerin oranları (%)*					
C <sub>3</sub> S	53,2	36,6	24,4	57	**
C <sub>2</sub> S	16,7	11,5	8,1	14,8	**
C <sub>3</sub> A	7,6	5,2	3,7	2,3	**
C <sub>4</sub> AF	10,7	7,3	4,9	15,8	**
*: Hesaplar ana bileşenlerin klinkerdeki, klinkerin de çimento içerisindeki yüzdesinden hareketle yapılmıştır. **: Üretici firmadan klinkerle ilgili bilgiler alınmadığı için hesaplanamamıştır.					
<b>Fiziksel Özellikler</b>					
Özgül Ağırlık	3.17	2.94	2.92	3.16	3.22
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3285	4403	4459	3290	3150
Başla. priz süresi (min)	170	175	220	165	256
Bitiş priz süresi (min)	230	220	270	280	268
Genleşme (Le Chaletier)	1	2	1	2	-
<b>Basınç Dayanımları (MPa)</b>					
2 günlük	27.90	20.60	12.6	20.60	-
7 günlük	41.90	33.00	22.3	30.60	-
28 günlük	55.90	44.10	38.3	37.90	95

<sup>2</sup> Çizelgedeki ilk üç çimento tipinin adı TS EN 197-1 (Anonim 2002b)'ye göredir. Ancak kolaylık açısından tezde bu çimento tiplerinin adları, parantez içinde verildiği şekli ile, kısaltılarak kullanılmıştır.

### 3. 1. 3. Karışım suyu

Betona TS 500 (Anonim 2000)'e uygun olarak asit reaksiyonu göstermeyen, agresif karbonik asit, magnezyum tuzları, yağ, organik madde ve endüstri atıkları içermeyen kısaca içilebilirlik özelliği gösteren su katılmıştır. Çalışmada karışım suyu olarak Atatürk Üniversitesi şebeke suyu kullanılmıştır

### 3. 1.4. Uçucu kül

KYB'nin hamur miktarını attırmak için mineral katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül Çayırhan Termik Santrali'nden temin edilmiş olup özgül yüzeyi 1947 cm<sup>2</sup>/g, özgül ağırlığı ise 2,39'dür. Bu değerler tedarikçi firmadan alınmıştır.

### 3. 1. 5. Yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı (YNSA)

Karışımlarda polikarboksilik eter esaslı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. BASF-YKS firması ürünü olan bu katkı piyasaya GLENİUM C303 adıyla sürülmüş olup yoğunluğu 1,02-1,06 kg/dm<sup>3</sup> arasındadır (hesaplarda bu iki değer ortalama kullanılmıştır). Açık yeşil renkli bu katkının klor içeriği %0,1'in, alkali içeriği ise %3'ün altındadır. Üretici firma bu katkının 100 kg bağlayıcıya (çimento-mikro silika- uçucu kül-cüruf gibi) 1,0-2,0 kg arasında katılmasını önermektedir.

## 3. 2. Deneyleerde kullanılan aletler

Çalışmada agrega deneyleri için ilgili standartlarda belirtilen aletlerden başka 60 dm<sup>3</sup> kapasiteli, 25 devir/dk karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi betonier ile taban çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan metalden yapıllı kesik koni şeklindeki çökme konisi kullanılmıştır. İlaveten, Ø100×200 mm boyutlarında silindir ve 70x70x280 mm boyutlarındaki prizmatik kalıplar kullanılmıştır.

Çalışmada numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesinde yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen hidrolik pres kullanılmıştır. Basınç deneyine başlamadan önce numunelerin yük uygulanacak olan kesitleri hassas bir şekilde ölçülmüştür. Bu işlem için, Şekil 3.1’de verilen, 300 mm çene aralığına sahip 0,01 mm hassasiyetli TRONIC marka dijital boy ölçüm cihazı kullanılmıştır.



**Şekil 3.1.** Digital boy ölçüm cihazı

Bunlardan başka KYB deneylerinde özellik arz eden çeşitli aletler de kullanılmıştır. Bu aletler ile ilgili ayrıntılı bilgiler Yöntem bölümünde verilmiştir.

### **3. 3. Yöntem**

Bu bölümde; agrega granülometrisi belirleme yöntemi, parametreler ve kodlama, karışım hesapları, beton üretimi, taze ve sertleşmiş beton deneyleri anlatılmıştır. Deneylerin tamamı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi ve Tatbiki Mekanik Laboratuvarı’nda yapılmış olup deneysel bulgular Araştırma Bulguları ve Tartışma kısmında verilmiştir.



### 3. 3. 1. Granülometri eğrisinin belirlenmesi

TS 3530 EN 933-1 (Anonim 1999)'da verilen kare gözlü elek serisi kullanılarak yapılan elek analizi deneyinde kullanılan agregaların elek analizleri yapılmıştır. Ancak, çalışmada ayarlanmış tek tip granülometri eğrisi kullanılmıştır. Bu yüzden agregalar karışıma doğal halleri ile değil belli tane sınıflarına (0/2, 2/4, 4/8 ve 8/16) ayrılmış olarak katılmıştır. Ayarlanmış granülometri eğrisi için ön deneylerden sonra kesinleştirilen agrega oranları ise 0/2'den %30, 2/4'den %25, 4/8'den %25 ve 8/16'den %20 şeklindedir. Buradan ince/iri agrega oranınının 55/45 olduğu ortaya çıkmaktadır ki bu oran Kendiliğinden Yerleşen Beton İçin Avrupa Kılavuzu (Anonim 2007)'de ve Su *et al.* (2001)'de tavsiye edilen aralıktadır. Maksimum agrega boyutu ( $d_{max}$ ) ise, konu ile ilgili literatürün ittifakla 20-22 mm'in altında kalması önerisine uyularak, 16 mm seçilmiştir. Buna göre seçilen granülometri eğrisi çoğunlukla TS 706 (Anonim 1980b)'de  $d_{max}=16$  mm için verilen eğrilerinden A<sub>16</sub>/B<sub>16</sub> arasında kalmaktadır.

### 3. 3. 2. Parametreler ve Kodlama

Çalışmada 5 farklı iri agrega türü ve 5 farklı çimento tipi parametre olarak seçilmiştir. Agregalar; beyaz kalker (BK), gri kalker (GK), su emmesi düşük özgül ağırlığı yüksek bazalt (B1), su emmesi yüksek özgül ağırlığı düşük bazalt (B2) ve normal yuvarlak agrega (NA)'dan oluşmaktadır. Agregalardan NA hariç diğerleri kırmataştır. Çimentolar ise Normal Portland Çimentosu (CEM I 42.5 R), CEM II/B-M 32.5 R, CEM V/A 32.5 N, Sülfata Dayanıklı Çimento (SDÇ) ve Alüminatlı Çimento (AÇ)'dir.

Bu parametrelere göre üretilen karışımlar önce çimento tipi daha sonra da agrega türü gösterilmek üzere kodlanmıştır. Ancak, kodlamada uzun ve karmaşık gösterimlerden sakınmak için çimento tipleri, eski Türk standartlarında olduğu gibi, adlarının ilk harfleri ile kısaltılarak gösterilmiştir. Buna göre; CEM I yerine PÇ (Normal Portland Çimentosu), CEM II/B-M yerine PKÇ (Portland Kompoze Çimento) ve CEM V/A yerine KZÇ (Kompoze Çimento) kullanılmıştır. Buna göre; **PÇBK** ile kodlanan

karışımda Normal Portland Çimentosu (PÇ=CEM I 42.5 R) ve beyaz kalker (BK) kullanıldığı anlaşılmalıdır.

### 3. 3. 3. Beton karışım hesapları

Çalışmada yukarıda belirtilen beş farklı agrega ve beş farklı çimento ile üretilen yirmi beş beton grubu oluşturulmuştur. Karışım hesapları yapılırken de TS 802 (Anonim 1985) standardı göz önünde bulundurulmuştur. Bu standarda göre betonu oluşturan bileşenlerin hacimlerinin toplamı  $1000 \text{ dm}^3$ 'e eşit olmalıdır (Formül 3.1).

$$W + \frac{W_c}{\gamma_c} + \frac{W_a}{\gamma_a} + \frac{W_{uk}}{\gamma_{uk}} + \frac{W_{sa}}{\gamma_{sa}} + H = 1000 \text{ dm}^3 \dots\dots\dots (3.1)$$

Bu formülde; W suyun hacmi,  $W_c$  çimentonun kütlesi,  $W_a$  agreganın kütlesi,  $W_{uk}$  uçucu külün kütlesi,  $W_{sa}$  akışkanlaştırıcının kütlesi,  $\gamma_c$  çimentonun özgül ağırlığı,  $\gamma_a$  agreganın özgül ağırlığı,  $\gamma_{uk}$  uçucu külün özgül ağırlığı,  $\gamma_{sa}$  akışkanlaştırıcının özgül ağırlığı ve H ise toplam hava miktarını göstermektedir. Bütün ağırlıkların kg, hacimlerin ise  $\text{dm}^3$  cinsinden olduğu formülde agrega tek bir sınıf olarak göz önünde bulundurulmuştur.

Bütün karışımlarda çimento dozajı  $375 \text{ kg/m}^3$ , uçucu kül  $75 \text{ kg/m}^3$ , filler miktarı  $100 \text{ kg/m}^3$  ve su miktarı  $175 \text{ kg/m}^3$  olarak sabit alınmıştır. Bu oranlar Kendiliğinden Yerleşen Beton İçin Avrupa Klavuzu (Anonim 2007)'da belirtilen kriterlere uygundur. Bu kılavuzda çimento+uçucu kül+fillerden oluşan toz oranının  $380\text{-}600 \text{ kg/m}^3$  olması, suyun  $150\text{-}210 \text{ kg/m}^3$  olması gerektiği belirtilmektedir. Yeni nesil süperakışkanlaştırıcının (YNSA) ise ön denemelerden sonra bağlayıcı (çimento+uçucu kül) ağırlığının %1,9'u oranında olması kararlaştırılmıştır. Bu oran üretici firmanın bu katkı için önerdiği üst sınırın altında kalmaktadır. Belirlenen bu değerlerden sonra su/bağlayıcı oranı 0,39 çıkmıştır. Hesaplarda hava hacmi ise  $15 \text{ dm}^3/\text{m}^3$  alınmıştır. Çalışmada sabit kabul edilen su miktarı ve hava içeriği Su *et al.* (2001)'de belirtilen değerlerden hareketle seçilmiştir.

Karışım hesaplarında ayarlanmış granülometri eğrisi esas alınarak Formül 3.1'den hareketle her bir tane sınıfı için agrega hacimleri bulunmuştur. Agregaların kuru yüzey doygun ağırlıkları hesaplanmış yüzey nemi oranına göre de düzeltmeler yapılarak beton için gereken malzeme miktarları belirlenmiştir. Örnek olması açısından, PÇBK (beyaz kalker + CEM I 42.5 (PÇ 42.5)) karışımı için yapılan karışım hesabı detayları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** PÇBK karışımı için karışım hesabı

Bileşen Adı		Özgül ağırlık	Hacim (dm <sup>3</sup> )	Kütle (kg)
Çimento (CEM I 42.5)		3,17	118	375
Su		1	175	175
Hava			15	-
Kimyasal katkı (YNSA)		1,04	8,2	8.55
Mineral katkı (Uçucu kül, UK)		2,39	31	75
Filler		2,70	37	100
İnce agrega	0/2 (%30)	2,54	185	470
	2/4 (%25)	2,54	154	391
İri agrega (Beyaz kalker)	4/8 (%25)	2,69	154	414
	8/16 (%20)	2,69	123	331
<b>Toplam</b>			1000	2340

Üretilen yirmi beş beton grubunda kullanılan malzeme oranları ise Çizelge 3.4'de verilmiştir. Bu çizelgede hem hesapla bulunan teorik değerler hem de ölçülen birim ağırlık deneyinden hareketle bulunan gerçek karışım miktarları gösterilmiştir.

### 3. 3. 4. Betonun üretilmesi

Karışım hesapları sonucu belirlenen malzeme miktarları hassas bir şekilde tartılarak aşağıda belirtilen sıraya göre betoniye konulup numuneler üretilmiştir. Betoniye malzeme konulmadan önce iç yüzeyleri ve kanatları iyice temizlenerek hafifçe nemlendirilmiştir.

Çizelge 3.4. KYB bileşenlerinin teorik (T) ve gerçek (G) miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

	Kodu		Çimento	UK	Filler	Su	YNSA	0/2	2/4	4/8	8/16	Birim Ağırlık
1	PÇBK	T	375	75	100	175	8,55	470	391	414	331	2.340
		G	380	76	101	178	8,67	477	397	420	336	2.374
2	PKÇBK	T	375	75	100	175	8,55	462	384	406	326	2.312
		G	382	76	102	178	8,71	471	391	414	332	2.357
3	SDÇBK	T	375	75	100	175	8,55	467	391	414	331	2.337
		G	376	75	100	176	8,58	469	393	416	332	2.346
4	KZÇBK	T	375	75	100	175	8,55	462	384	406	326	2.312
		G	375	75	100	175	8,54	462	384	406	326	2.309
5	ABK	T	375	75	100	175	8,55	470	391	414	334	2.343
		G	384	77	103	179	8,76	482	401	424	342	2.401
6	PÇNA	T	375	75	100	175	8,55	470	391	405	323	2.323
		G	379	76	101	177	8,63	474	395	409	326	2.345
7	PKÇNA	T	375	75	100	175	8,55	462	384	397	318	2.295
		G	381	76	101	178	8,68	469	390	403	323	2.329
8	SDÇNA	T	375	75	100	175	8,55	467	391	405	323	2.320
		G	379	76	101	177	8,65	472	395	410	327	2.346
9	KZÇNA	T	375	75	100	175	8,55	462	384	397	318	2.295
		G	377	75	101	176	8,61	465	386	400	320	2.310
10	ANA	T	375	75	100	175	8,55	470	391	405	326	2.326
		G	383	77	102	179	8,73	480	399	414	333	2.375
11	PÇB1	T	375	75	100	175	8,55	470	391	413	330	2.338
		G	382	76	102	178	8,70	478	398	420	336	2.381
12	PKÇB1	T	375	75	100	175	8,55	462	384	405	324	2.309
		G	377	75	101	176	8,60	465	386	407	326	2.323
13	SDÇB1	T	375	75	100	175	8,55	467	391	413	330	2.335
		G	377	75	101	176	8,60	470	393	415	332	2.347
14	KZÇB1	T	375	75	100	175	8,55	462	384	405	324	2.309
		G	376	75	100	175	8,56	463	385	406	325	2.313
15	AB1	T	375	75	100	175	8,55	470	391	413	331	2.339
		G	378	76	101	176	8,62	474	394	417	334	2.359
16	PÇB2	T	375	75	100	175	8,55	470	391	377	301	2.273
		G	393	79	105	184	8,97	493	410	395	316	2.385
17	PKÇB2	T	375	75	100	175	8,55	462	384	370	297	2.247
		G	380	76	101	177	8,65	468	389	375	301	2.274
18	SDÇB2	T	375	75	100	175	8,55	467	391	377	301	2.270
		G	378	76	101	176	8,61	470	394	380	303	2.285
19	KZÇB2	T	375	75	100	175	8,55	462	384	370	297	2.247
		G	375	75	100	175	8,55	462	384	370	297	2.247
20	AB2	T	375	75	100	175	8,55	470	391	377	304	2.276
		G	376	75	100	175	8,57	471	392	378	305	2.282
21	PÇGK	T	375	75	100	175	8,55	470	391	417	333	2.345
		G	382	76	102	178	8,70	478	398	424	339	2.385
22	PKÇGK	T	375	75	100	175	8,55	462	384	409	328	2.317
		G	379	76	101	177	8,63	467	388	413	331	2.339
23	SDÇGK	T	375	75	100	175	8,55	467	391	417	333	2.342
		G	380	76	101	177	8,67	474	396	423	338	2.374
24	KZÇGK	T	375	75	100	175	8,55	462	384	409	328	2.317
		G	378	76	101	176	8,62	466	387	412	331	2.336
25	AGK	T	375	75	100	175	8,55	470	391	417	336	2.348
		G	381	76	102	178	8,70	478	398	424	342	2.387

Betoniyere önce iri agregalar (4/8, 8/16) ardından toz maddeler (çimento, uçucu kül, filler) konulup bir ön karıştırma yapıldıktan sonra kum (0/2, 2/4) eklenmiştir. Homojen bir karışım elde etmek için yaklaşık 1 dk. karıştırılmış ve suyun %60'ı karışıma eklenip 1,5 dk daha karıştırıldıktan sonra suyun geri kalan kısmına YNSA katkı eklenerek karışıma ilave edilmiş ve 2 dk daha karıştırılmıştır. Sonrasında karışım 1,5 dk dinlendirilmiş ardından 2 dk daha karıştırılarak toplam 8 dakikada karıştırma tamamlanmıştır. Bu yöntem Sonebi *et al.* (2007)'de uygulanan yöntemin benzeridir.

### **3. 3. 5. Taze beton deneyleri**

Üretilen betonlardan TS EN 12350-1 (Anonim 2002d)'de belirtilen numune alma yöntemleri uygulanarak taze beton deneyleri için numuneler alınmıştır. Taze beton deneyleri klasik birim ağırlığı deneyi ile KYB'nin taze haldeki temel özelliklerini belirlemeye yönelik olan deneylerden (yayılma,  $T_{500}$  süresi ölçümü, U-Kutusu ve elek ayrışması deneyleri) oluşmaktadır. Yöntemleri aşağıda açıklanan bu deneylerden elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde Çizelge 4.1'de toplu olarak verilmiştir.

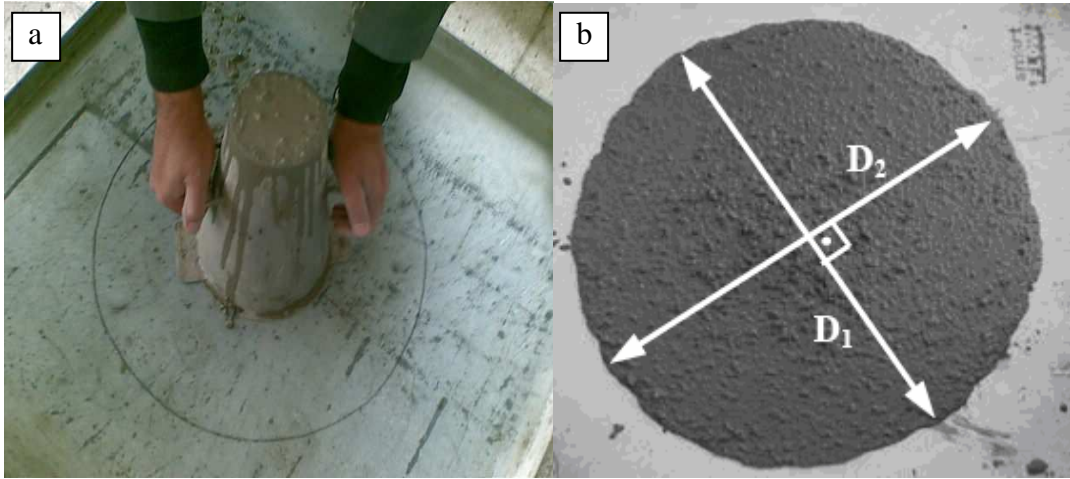
#### **3. 3. 5. 1. Birim ağırlık deneyi**

Taze betonun birim ağırlığının bulunmasında hacmi belli olan ( $2,153 \text{ dm}^3$ ) birim ağırlık kabından yararlanılmıştır. Bu kabın içerisine beton konulmuş ve tartılmıştır. Kabın darası bu ağırlıktan düşülerek betonun ağırlığı bulunmuştur. Bulunan ağırlık kabın hacmine bölünerek birim ağırlık değeri hesap edilmiştir.

### 3. 3. 5. 2. KYB'nin taze haldeki temel özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler

#### 3. 3. 5. 2. 1. Yayılma deneyi ve $T_{500}$ süresi ölçümü

KYB'nin yayılma deneyi ve  $T_{500}$  süresinin ölçümü için Şekil 3.2 (a)'de görülen standart çökme hunisi kullanılmıştır. Huni sıkıştırma işlemi yapılmadan doldurularak kaldırılmış ve betonun önceden tablaya işaretlenen 500 mm'lik çapa gelme süresi ( $T_{500}$ ) ile nihai yayılma çapı ölçülerek (Şekil 3.2 (b)) deney tamamlanmıştır.



Şekil 3.2. Yayılma deneyinin yapılması (a) ve yayılma çapının ölçülmesi (b)

#### 3. 3. 5. 2. 2. U-Kutusu deneyi

KYB'nin geçme yeteneğinin belirlenmesinde U şeklinde kutu tipi aletler kullanılmaktadır. Betonun kendi ağırlığı ile farklı sayıda ve çapta donatılar arasından geçtiği bu deneyde bölünmüş kutunun diğer tarafında eriştiği yükseklik ölçülerek değerlendirme yapılmaktadır. Bu çalışmada U-Kutusu deneyi için 60 cm uzunluğunda ve 30×25 cm boyutlarında ortadan ikiye bölünmüş ve bölmenin alttan 150 mm'lik kısmına 45, 35, 35, 45 mm arayla yerleştirilmiş Ø13'lük demirlerin bulunduğu U-Kutusu aleti kullanılmıştır (Şekil 3.3).



**Şekil 3.3.** U-Kutusu Deneyi

### 3. 3. 5. 2. 3. Elek ayrışması deneyi

Bu deney kendiliğinden yerleşen betonun ayrışma direncinin (segregasyon) ölçülmesi için uygulanır. Çalışmada numuneler üretildikten sonra taze betondan yaklaşık 10 litre alınarak 15 dk bekletilmiş ve gözlenen herhangi bir ayrışma veya terleme olayı not edilmiştir. Daha sonrada bu beton 5 mm<sup>2</sup>'lik delikleri olan bir elek üzerine dökülmüş (Şekil 3.4) 2 dk da sonra elekten geçen numune ağırlığı kaydedilmiştir. Ayrışma oranı elekten geçen numune miktarı tartılarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3.4.** Elek ayrışması deney düzeneği ve deneyin yapılması

### 3. 3. 6. Sertleşmiş beton deneyleri

Üzerinde taze beton deneyleri yapılan betonlar tekrar karışıma eklenmiştir. 1 dakikalık karıştırmadan sonra standart basınç dayanımı için 2 adet  $\varnothing 100 \times 200$  mm boyutundaki silindir, sülfat direnci deneyi için ise 4 adet (2 kontrol 2 de deneye tabi)  $70 \times 70 \times 280$  mm boyutundaki prizmatik numuneler üretilmiştir (Şekil 3.5). Numune kalıplara konulurken hiçbir sıkıştırma işlemi uygulanmamıştır. Yerleştirme işleminden sonra kalıplardaki beton yüzeyi mala ile düzeltilmiştir.



**Şekil 3.5.** Sertleşmiş beton deneyleri için üretilen numuneler

Kalıba yerleştirilen numuneler, olası nem kaybını önlemek için, çimento hamuru ile reaksiyona girmeyen ve su emmeyen malzemedan yapılmış naylon örtü ile örtüldükten sonra sarsıntısız bir zeminde sertleşmeye bırakılmıştır. 24 saat boyunca kalıpta duran numuneler bu süre sonunda kalıptan çıkarılmış ve sıcaklığı  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  olan kirece doymun su içeren kür havuzunda her bir deneyin yapılacağı güne kadar saklanmışlardır.



### 3. 3. 6. 1. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyi 28. günde, Ø100×200 mm'lik numuneler üzerinde yapılmıştır. Numunelerin boyutları 300 mm çene aralığına sahip 0,01 mm hassasiyetli dijital boy ölçüm cihazı (Şekil 3.1) ile ölçülerek yükün etkiyeceği alan belirlenmiştir. Daha sonra yükün bütün alana üniform dağılmasını sağlamak amacıyla kükürten başlık tabakası yapılmıştır. Başlıklama işleminden sonra numuneler üç-dört saat sertleşmeye bırakılmış sonrasında basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Bu deney 300 ton kapasiteli hidrolik preste gerçekleştirilmiş olup yükleme hızı, tüm numuneler için aynı olmak üzere, 0.4 MPa/sn alınmıştır.

### 3. 3. 6. 2. Sülfat deneyleri

Sülfat çözeltisi etkisinde kalan hidrate çimentolu sistemlerin performansını araştırmak için çeşitli deneysel yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu metotlar; pH kontrolü, sülfat konsantrasyonu, tuz tipleri ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ...), çözeltide bekletme süresi ve hasarın ölçüm yöntemi hususlarında birbirlerine göre farklılık arz etmektedirler (Glasser *et al.* 2008).

Yukarıda belirtilen farklılıklar içinde en çok tartışılan sülfat konsantrasyonudur. Örneğin, konu ile ilgili iki Amerikan standardından biri olan ASTM C1012 (Anonymous 1995)'de çözelti olarak 50 g/l'lik sodyum sülfat çözeltisi önerilmektedir. (Diğer standart ise ASTM C452'dir. Ancak bu standart bütün çimento türleri için tam doğru sonuçlar vermemektedir (Stephens and Carrasquillo (2000)). Tosun vd (2003) tarafından yapılan bir çalışmada ASTM C1012'nin önerdiği çözeltinin hazırlanan karışımların sülfat dayanıklılığı açısından farklılıklarını ortaya koymada yetersiz kaldığı belirtilmektedir. Yazıcı (2006) da bu sonucu göz önünde bulundurarak yaptığı çalışmada 150 g/l'lik sodyum sülfat çözeltisi kullanmıştır. Ayrıca, ASTM C1012 harçların sülfat hücumu karşısındaki performansları ile ilgili olup betonların davranışını tam olarak yansıtmayabileceği endişesi de taşınmaktadır (Kasap vd 2007).

Betonların sülfat direncini belirlemede başvurulan standartlardan biri de USBR 4908 (Anonymous 1992)'dir. Bu standartta üç farklı metot önerilmektedir. Metot A: %2,1  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisine daldırma, Metot B: %10  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde saklama ve Metot C: 16 saat %2,1  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde bekletme 8 saat  $54^\circ\text{C}$ 'de kurutma. Bunlardan Metot B daha doğru sonuçlar verdiği için (Stephens and Carrasquillo 2000) bu çalışmada da %10  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  konsantrasyonu kullanılmıştır. Atahan vd (2003) ve Kasap vd (2007) de çalışmalarında bu oranda ve türde sülfat çözeltisi kullanmışlardır.

Belirlenen çözeltiyi hazırlamak için saf su ve toz halinde olan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  kullanılmıştır. Sülfatlı solüsyonlar saf suya su miktarının %10'u kadar  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  katılmasıyla hazırlanmıştır.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 'ın suda iyice çözünmesi için sürekli karıştırılmış ve böylece çökeltisiz solüsyonlar elde edilmiştir. Solüsyonların pH değerleri 8-8,50 arasındadır. Buharlaşma nedeniyle olabilecek yoğunluk değişmelerini önlemek için hazırlanan çözeltiler kapaklı plastik kutularda saklanmıştır (Şekil 3.6). Solüsyonların pH değerleri her ay ölçülmüş ve gerektiği zamanlarda  $\text{H}_2\text{SO}_4$  titrasyonu ile (Dilek ve Tokyay 2007) pH değerinin 8-8,50 arasında kalması sağlanmıştır.



**Şekil 3.6.** Numunelerin %10  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde saklanması

Sülfat deneylerine numuneler 60 günlük iken başlanılmış olup deney boyunca aynı çimento tipine sahip numuneler aynı kutuda bulundurulmuştur. Numuneler yerleştirildikten sonra her 2 haftada bir ağırlık ölçümleri yapılmış ve sonra tekrar solüsyonlara daldırılmışlardır. Kontrol grubuna ait numuneler ise kirece doymun su

tanklarında saklanmışlardır. Deney süresi 6 ay olarak belirlenmiş olup her bir deney sonucu iki numunenin ortalaması alınarak bulunmuştur. Sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

##### 4. 1. Taze Beton Deneylerinin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

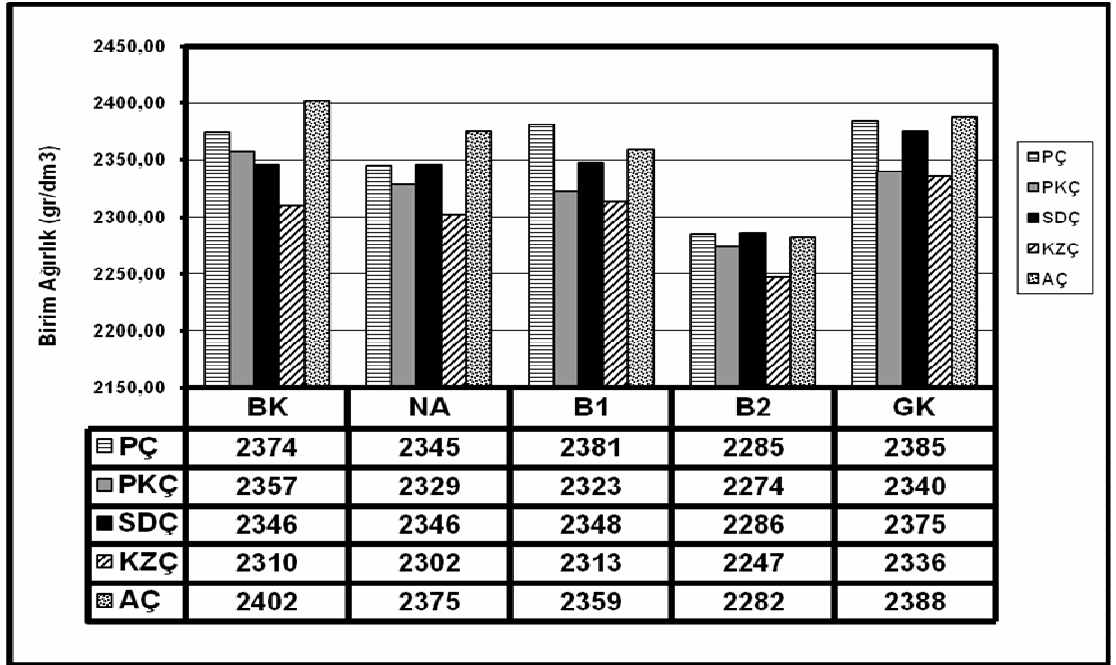
Çalışmada elde edilen taze beton deneylerinin sonuçları Çizelge 4.1’de toplu olarak verilmiş, izleyen alt bölümlerde ise her bir deney sonucu ayrı ayrı irdelenmiştir.

Çizelge 4.1. Taze beton deneyleri sonuçları

	Kodu	Birim Ağırlık (gr/dm <sup>3</sup> )	KYB deneyleri			
			T <sub>500</sub> süresi	Yayılma Çapı (cm)	U-Kutusu (cm)	Elek ayrışması
1	PÇBK	2374	6,04	66,5	13,0	5,53
2	PKÇBK	2357	6,21	67,0	9,0	8,22
3	SDÇBK	2346	3,84	71,0	7,0	7,52
4	KZÇBK	2310	5,00	71,0	1,5	0,00
5	ABK	2402	6,03	63,0	13,0	8,74
6	PÇNA	2345	4,02	72,0	3,0	12,15
7	PKÇNA	2329	5,21	67,0	0,5	9,82
8	SDÇNA	2346	3,03	69,0	1,0	5,87
9	KZÇNA	2310	3,57	71,0	0,5	2,05
10	ANA	2375	5,40	67,0	5,0	6,92
11	PÇB1	2381	6,02	66,0	12,0	12,19
12	PKÇB1	2323	4,49	70,0	11,5	13,71
13	SDÇB1	2348	5,46	70,5	13,0	12,30
14	KZÇB1	2313	6,01	66,0	10,0	5,56
15	AB1	2359	5,24	63,5	11,0	11,41
16	PÇB2	2285	5,40	69,0	14,0	10,81
17	PKÇB2	2274,5	4,72	67,5	13,0	11,97
18	SDÇB2	2286	5,23	69,5	11,0	8,29
19	KZÇB2	2247	5,23	70,0	8,5	7,43
20	AB2	2282	4,40	65,5	13,0	5,75
21	PÇGK	2386	5,64	66,5	15,0	8,71
22	PKÇGK	2340	5,51	64,0	15,0	9,71
23	SDÇGK	2375	4,89	68,0	14,0	9,09
24	KZÇGK	2336	6,29	73,0	1,0	8,12
25	AGK	2388	6,41	65,5	13,5	7,19

#### 4. 1. 1. Birim ağırlık deneyinin değerlendirilmesi

Deneysel elde edilen birim ağırlık sonuçları iki farklı şekilde değerlendirilmiştir. İlki, bu değerlerden hareketle karışıma giren gerçek malzeme miktarları belirlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 3.4’de verilmiştir. İkincisi ise parametrelerinin değişmesinden KYB’lerin birim ağırlıklarının nasıl etkilendiği konusudur. Aşağıda birim ağırlık deneyinden elde edilen sonuçlar grafize edilerek bu husus irdelenmiştir.



**Şekil 4.1.** KYB’nin birim ağırlıklarının agrega ve çimento türüne göre değişimi

Şekil 4.1’den, BK katılan karışımlarda en fazla birim ağırlığa  $2402 \text{ gr/dm}^3$  değeriyle AÇ’li betonların sahip olduğu bunu PÇ’li karışımların izlediği ( $2374 \text{ gr/dm}^3$ ) geriye kalanlardan PKÇ ve SDÇ’li olanların ise birbirine yakın değerlere (sırasıyla  $2357$  ve  $2346 \text{ gr/dm}^3$ ) sahip olduğu görülmektedir. En düşük birim ağırlık değeri ise KZÇ’li karışımlarda ( $2310 \text{ gr/dm}^3$ ) görülmüştür.

NA’lı karışımlarda en düşük birim ağırlık  $2302 \text{ gr/dm}^3$  değeriyle KZÇ’li karışımlarda ve en fazla birim ağırlık ise  $2375 \text{ gr/dm}^3$  değeriyle AÇ’li karışımlarda görülmüştür. PÇ

ve SDC'li karışımlar birbirlerine oldukça yakın değerlere (sırasıyla 2345 ve 2346 gr/dm<sup>3</sup>) sahip betonlardır. Bu karışımları ise 2329 gr/dm<sup>3</sup> değeriyle PKÇ'li betonlar izlemiştir.

Su emmesi düşük özgül ağırlığı yüksek bazalt (B1) içeren karışımlarda ise en fazla birim ağırlık PÇ'li betonlarda (2381 gr/dm<sup>3</sup>) görülmüştür. Bunu AÇ'li ve SDC'li karışımlar (sırasıyla 2359 ve 2348 gr/dm<sup>3</sup>) ve bunları da PKÇ'li ve KZÇ'li karışımlar (2323 ve 2313 gr/dm<sup>3</sup>) izlemiştir. Su emmesi yüksek özgül ağırlığı düşük bazaltlı (B2) karışımlarda ise KZÇ'li karışımlar hariç (2247 gr/dm<sup>3</sup>) diğer karışımlar birbirine çok yakın (2275 ve 2286 gr/dm<sup>3</sup> arasında) değerler almışlardır.

GK ile üretilen betonlarda en büyük birim ağırlık değeri birbirine oldukça yakın sonuçlarla AÇ'li ve PÇ'li karışımlarda (sırasıyla 2388 ve 2385 gr/dm<sup>3</sup>) görülmüştür. Bunları 2375 gr/dm<sup>3</sup> değeriyle SDC'li karışımlar bunu da hemen hemen aynı değerlere sahip PKÇ'li ve KZÇ'li betonlar (sırasıyla 2340 ve 2336 gr/dm<sup>3</sup>) izlemiştir.

Her bir agrega türüne göre ortalama alınarak bir değerlendirme yapıldığında B2'li olanların 2275 gr/dm<sup>3</sup>, NA'lı olanların 2339 gr/dm<sup>3</sup>, B1'li olanların 2345 gr/dm<sup>3</sup>, BK'lı karışımların 2358 gr/dm<sup>3</sup> ve GK'lı karışımların 2368 gr/dm<sup>3</sup> değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Görüldüğü gibi en yüksek birim ağırlık değeri GK'lı karışımlarda, en düşük birim ağırlık değeri ise B2'li karışımlarda elde edilmiştir. GK'lı karışımlar B2'li karışımlardan %4 daha yüksek birim ağırlık değerine sahiptir.

Agrega türünün değişmesi ile betonların birim ağırlıklarında görülen değişmeler agregaların özgül ağırlıkları ilişkilidir. Yüksek özgül ağırlığa sahip agrega içeren karışımların birim ağırlıklarının da yüksek olduğu tespit edilmiştir. Agregalar türleri içinde en yüksek özgül ağırlıklara kalker grubu (GK ve BK) agregaların sahip oldukları (ortalama 2,70) Çizelge 3.1'den görülmektedir. Buna karşın, en düşük özgül ağırlık değerine (2,45 gr/dm<sup>3</sup>) ise yüksek su emme değerine sahip bazalt (B2) sahiptir. Buradan aynı çimento tipine sahip ancak farklı iri agrega içeren KYB'lerin birim ağırlıklarının agregaların özgül ağırlıklarına bağlı olarak değiştiği sonucu çıkarılabilir.

Çimento türüne göre bulunan ortalamalarda en büyük birim ağırlık  $2361 \text{ gr/dm}^3$  değeriyle AÇ'li betonlarda, en düşük birim ağırlık değeri ise  $2301 \text{ gr/dm}^3$  ile KZÇ'li karışımlarda görülmüştür. PÇ'li olanlar  $2354 \text{ gr/dm}^3$  ve SDC'li olanlar  $2340 \text{ gr/dm}^3$  değerlerine sahip olup bunları da  $2325 \text{ gr/dm}^3$  değeriyle PKÇ'li betonlar izlemiştir. AÇ'li karışımlar KZÇ'li karışımlara oranla %2,6 daha fazla birim ağırlık değerine sahiptir.

Çimento ile ilgili varılan sonuçlar da çimentoların özgül ağırlıkları ile ilişkilendirilerek açıklanabilir. Agregalardakine benzer olarak, en yüksek özgül ağırlığa sahip çimentolarla üretilen karışımların en fazla birim ağırlığı sahip olduğu tespit edilmiştir. Nitekim,  $2361 \text{ gr/dm}^3$  ile en yüksek birim ağırlık değerine sahip olan AÇ'li karışımlarda kullanılan Kalsiyum Alüminatlı Çimento'nun 3,22 ile en yüksek özgül ağırlığa sahip olduğu Çizelge 3.2'den görülmektedir. Ayrıca, yine aynı çizelgeden,  $2301 \text{ gr/dm}^3$  ile en düşük birim ağırlığa sahip KZÇ'li karışımlarda kullanılan Kompoze Çimento'nun da 2,92 ile en düşük özgül ağırlığa sahip olduğu görülmektedir.

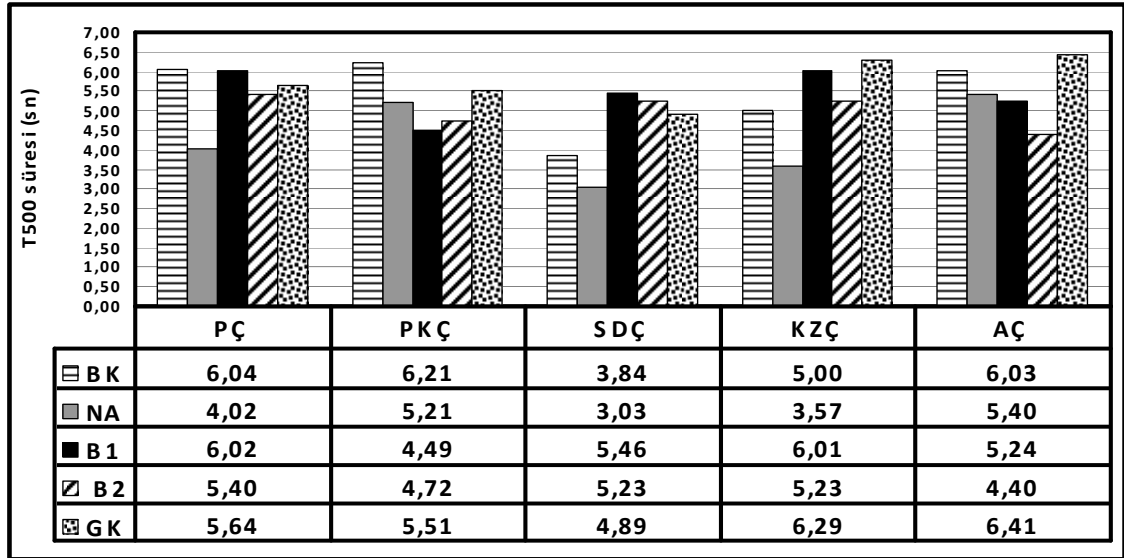
İri agregaya çeşidi ve çimento tipi faktörleri birlikte göz önünde bulundurulduğunda ise en düşük birim ağırlığa KZÇ+B2 betonun, en yüksek birim ağırlığa ise AÇ+BK ve AÇ+GK betonlarının sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.1). Buradan, KYB'lerin birim ağırlıkları üzerinde kendisini oluşturan bileşenlerin özgül ağırlıklarının belirleyici rol oynadığı sonucuna varılabilir. Bu durum, aslında, normal betonlar da dahil bütün taneli kompozit malzemeler için beklenen bir sonuçtur.

#### **4. 1. 2. KYB'lerin taze haldeki temel özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler**

##### **4. 1. 2. 1. T<sub>500</sub> süresi deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi**

KYB teknolojisinde T<sub>500</sub> süresi betonun viskozitesini değerlendirmek için kullanılır. Bu deneyde elde edilen zaman değerleri KYB'nin viskozitesini ölçmez, fakat, akış hızını belirleme yoluyla viskozite ile ilgili bilgi verir. Düşük viskoziteli beton çok hızlı ilk

akışa sahip olacak sonrada duracaktır. Yüksek viskoziteli olanlar ise daha uzun süre sünmeye devam edeceklerdir (Anonim 2007). Bu çalışmada her bir karışım için elde edilen  $T_{500}$  süreleri Şekil 4.2'deki grafikte verilmiştir.



**Şekil 4.2.**  $T_{500}$  süresinin agrega ve çimento türüne göre değişimi

Şekil 4.2'den de görüldüğü gibi, bütün beton karışımlarında ölçülen  $T_{500}$  süresi 2 saniyenin üzerindedirler. Kendiliğinden Yerleşen Beton Kılavuzu (Anonim 2007) bu süreye sahip betonları VS2 sınıfında değerlendirmektedir. Söz konusu kılavuzda VS2 sınıfı için bir üst limit belirtilmemesine rağmen bu sınıftaki KYB'lerin kalıp basıncını sınırlandırmada ya da ayrışma direncini geliştirmede faydalı olabilen tiksotropik<sup>3</sup> etkileri göstermesi beklendiği belirtilmektedir.

Yukarıdaki şekilden BK katılan karışımlarda en hızlı yayılmanın 3.84 sn ile SDÇ'li betonlarda gerçekleştiği bunu KZÇ'li karışımların izlediği (5.0 sn) geri kalan çimentoların ise aşağı yukarı aynı sürede ve yavaş olarak aktıkları görülmektedir.

<sup>3</sup> Ajite edilen akışkanın viskozitesinin azalması daha akıcı hale gelmesi olayıdır. Bu olayın sebebi akışkanın taneciklerinin oryantasyonudur. Ajite edilen akışkandaki tanecikler daha düzenli (paralel) bir konuma gelirler. Akışkan bekletildiğinde ise tanecikler karışık duruma geri dönerler. Tanecikler birbirlerine paralel ise akışkan daha akıcı, karışık durumda ise daha az akıcı olur.



NA karışımlarda ise 500 mm'lik yayılma çapına en erken ulaşan karışım 3.03 sn ile yine SDC'li betonlar olmuştur. Bunu KZÇ'li betonlar (3.57 sn) ve PÇ'li karışımlar (4.02 sn) izlemiştir. PKÇ ve AÇ'li karışımlar ise birbirlerine oldukça yakın (sırasıyla 5.21 sn ve 5.40 sn) ve en yavaş yayılan karışımlardır. Diğer taraftan, Şekil 4.2'den, çalışmada üretilen 25 karışım içerisinde, dört karışım (PKÇ+B1, PKÇ+B2, AÇ+B1 ve AÇ+B2) hariç, NA ile üretilen karışımların daha hızlı  $T_{500}$  süresine sahip oldukları görülmektedir.

B1'li karışımlarda ise PKÇ'li olanlar diğer karışımlara göre daha hızlı (4.49 sn) yayılmış olup geriye kalanlardan SDC ve AÇ'li olanlar bir birine yakın (sırasıyla 5.46sn ve 5.24 sn), PÇ ve KZÇ'li olanlar ise hemen hemen aynı (sırasıyla 6.02 sn ve 6.01 sn) ve en yavaş yayılma sürelerine sahiptirler. B2'li karışımlarda ise PKÇ ve AÇ'li karışımların birbirlerine yakın sürelerde (sırasıyla 4.72 sn ve 4.40 sn) 500 mm'lik çapa ulaşmışken diğer üç çimento tipi aşağı yukarı aynı sürede belirtilen çapa ulaşmışlardır.

GK kullanılan betonlarda ise en hızlı yayılma süresi 4.89 sn ile SDC'li karışımlarda görülmüş iken PÇ ve PKÇ'li karışımlar bir birlerine çok yakın sürelerde (sırasıyla 5.64 sn ve 5.51 sn) yayılmışlardır. Buna karşın, KZÇ ve AÇ'li karışımların ise en yavaş (sırasıyla 6.29 sn ve 6.41 sn) ve birbirlerine yakın yayılma sürelerine sahip oldukları Şekil 4.2'den görülmektedir.

Her bir agrega türüne göre ortalama alınarak bir değerlendirme yapıldığında ise NA'lı olanların 4.25 sn, B2'li karışımların 5.00 sn, BK'li karışımların 5.42 sn, B1'li olanların 5.44 sn ve GK'li betonların 5.75 sn'lik ortalama yayılma sürelerine sahip oldukları tespit edilmiştir. Bu sonuçlar en hızlı yayılma süresine sahip betonların NA'lı karışımlar olduğunu göstermektedir. Buradan, öncelikle, diğer agrega türlerine nispeten küresel ve keskin köşesiz yapıya sahip dere agregasının kırmataş agregaya göre daha hızlı yayıldığı, dolayısı ile viskozitesi düşük KYB'lerin üretilmek istenmesi durumunda dere malzemesinin kullanılmasının doğru bir seçim olacağı sonucuna varılabilir.

Diğer taraftan, Materyal ve Metot bölümünde de belirtildiği gibi, B1 ve B2 türü agregaların her ikisi de bazalt olup bu agregaların su emme miktarı ve özgül ağırlıkları farklıdır. B1 düşük su emme oranı (%1,40) yüksek özgül ağırlık (2,68) değerine sahipken B2 yüksek su emme oranına (%3,2) düşük özgül ağırlık (2,45) değerine sahiptir. Yukarıda varılan sonuçlar bu veriler ile birlikte düşünüldüğünde aynı jeolojik kökene sahip olsa bile agreganın su emme ve özgül ağırlığının KYB'nin viskozitesi üzerinde etkisi olduğu sonucuna varılabilir. Su emme oranı yüksek, özgül ağırlığı düşük olan agregalarla üretilen KYB'lerin daha düşük viskoziteye sahip oldukları görülmüştür. Fakat, yaklaşık aynı su emme değerlerine sahip ancak özgül ağırlıkları farklı kalker agregalı (BK ve GK) karışımların yayılma süreleri göz önünde bulundurulduğunda, KYB'nin viskoz davranışı üzerinde su emmeden ziyade özgül ağırlığın daha belirleyici etkiye sahip olduğu söylenebilir. Nitekim, Çizelge 3.1'den de görülebileceği gibi, karışımda kullanılan iri agregaların özgül ağırlık sıralaması aşağıdaki gibidir:

$$B2 < NA < B1 < BK < GK$$

Buna karşın, yukarıdaki paragrafta,  $T_{500}$  süresine göre yapılan sıralamanın aşağıdaki şekilde olduğu belirtilmişti:

$$NA < B2 < B1 \approx BK < GK$$

Bu eşitsizlikten, NA hariç (ki bunun nedeni yukarıda açıklandı), KYB'lerin yayılma sürelerinin agrega yoğunluğuna bağlı olarak değişmekte olduğu ve yoğunluğu yüksek agregalarla üretilen KYB'lerin viskozitelerinin de yüksek olduğu görülmektedir. Bütün agrega çeşitleri içerisinde viskozitesi en yüksek KYB'nin en yüksek özgül ağırlık değerine sahip olan gri kalkerli karışım çıkmış olması varılan sonucu doğrulamaktadır. Bunun en önemli nedeni yoğunluğu düşük agregaların hareketinin daha kolay olmasıdır.

Çimento türüne göre bulunan ortalamalarda ise en hızlı  $T_{500}$  süresi 4.49 sn ile SDC'li karışımlarda bulunmuştur. Bunu hemen hemen aynı sürelerle PKÇ ve KZÇ'li karışımlar

(sırasıyla 5.23 sn ve 5.22 sn) bunları da yine birbirine çok yakın sürelerle PÇ ve AÇ'li betonların (sırasıyla 5.42 sn ve 5.50 sn) takip ettiği belirlenmiştir. Yani süreye göre sıralama aşağıdaki gibi olmuştur:

$$SDÇ < PKÇ \approx KZÇ < PÇ \approx AÇ$$

Çimentoların özgül ağırlık ve incelikleri ile yayılma süreleri karşılaştırıldığında arada net bir ilişkinin olmayışı ilginç bulunmuştur. Şöyle ki, çalışmada kullanılan PÇ ve SDÇ çimentoları hemen hemen aynı özgül ağırlık (sırasıyla 3,17 ve 3,16) ve incelik (sırasıyla 3285 cm<sup>2</sup>/g, 3290 cm<sup>2</sup>/g) değerlerine sahip olmasına rağmen SDÇ'li karışımlar PÇ'li olanlardan daha hızlı yayılmışlardır. Buna karşın, PKÇ ile KZÇ çimentoları da birbirine yakın özgül ağırlık (sırasıyla 2,94 ve 2,92) ve incelik (sırasıyla 4403 cm<sup>2</sup>/g, 4459 cm<sup>2</sup>/g) değerlerine sahip olmalarına rağmen aynı yayılma sürelerine sahiptirler.

Bir birine yakın (ya da aynı) özgül ağırlık ve inceliklere sahip olan çimentolar ile üretilen KYB'lerin yaklaşık aynı yayılma sürelerine sahip olmaları beklenir. Ancak, yukarıda verilen sıralamadan da görülebileceği üzere, PKÇ ve KZÇ'li karışımlarda bu beklenti gerçekleşmiş iken PÇ ve SDÇ'li karışımlarda gerçekleşmemiştir.

Diğer taraftan, kimyasal katkı ile aynı elektriksel yükü yüklenen tanecik sayısının fazla olması gibi nedenlerden dolayı, inceliği yüksek olan çimentolarla üretilen KYB'lerin daha hızlı yayılması beklenir. Bu çalışmada bu husus da kesin olarak belirlenememiştir. En hızlı yayılma süresine inceliği diğer çimentolara göre pek fazla olmayan SDÇ'li karışımlar sahip olmuştur. Buna karşın, beklenildiği gibi, en yüksek özgül ağırlık (3,22) ve en düşük incelik (3150 cm<sup>2</sup>/g) değerine sahip olan AÇ'li karışımlar en uzun yayılma süresine (5.50 sn) sahip olmuştur.

Son iki paragrafta belirtilen sonuçlar KYB'lerin viskoziteleri için çimentonun özgül ağırlık ve inceliklerinin tek başına göstereceği olamayacaklarını göstermektedir. Başka

faktörler de etkilemektedir. Bu faktörlerin içinde kimyasal katkı maddelerinin çimento ile etkileşimi büyük olasılık taşımakta olup bu konu daha ayrıntılı araştırılmalıdır.

Çimento tipi ve iri agrega çeşidinin yayılma süresi üzerindeki etkisi ile ilgili bir optimizasyon (en iyileme) yapılacak olursa SDC+NA'lı karışımların en kısa yayılma sürelerine sahip olduğu dolayısı ile düşük viskozite değerlerinin arandığı yerler için bu karışımların uygun olacağını söylemek mümkündür. Nitekim, Şekil 4.2'den, en yüksek akma hızına sahip olan karışımların SDC+NA (3,03sn) olduğu en düşük akma hızına sahip olan karışımın ise 6.41sn değeriyle AÇ+GK karışımı olduğu görülmektedir. Görüldüğü gibi, 500 mm'lik yayılma çapına en erken ulaşan karışım (SDC+NA) ile en geç ulaşan karışım (A+GK) arasında iki kattan daha fazla zaman farkı bulunmaktadır. Bu da, farklı çimento tiplerinin farklı agrega çeşitleriyle kullanıldıklarında viskoziteleri birbirinden oldukça farklı KYB'lerin elde edileceğini göstermektedir.

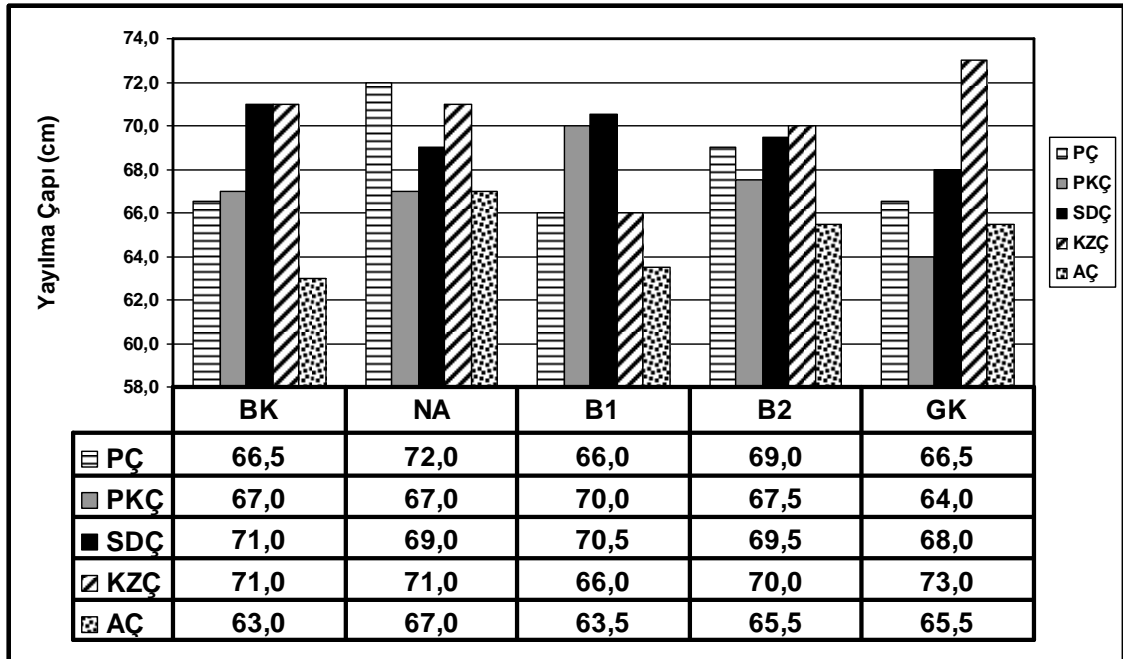
#### **4. 1. 2. 2. Yayılma deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi**

KYB üzerinde yapılan çalışmalarda betonun çökme-akma değeri geleneksel çökme konisi kullanılarak elde edilen yayılma çapı ile değerlendirilir. Çökme-akma değeri sargı kullanılmayan şartlarda taze karışımın akıcılığını tanımlar (Anonim 2007). Materyal ve Yöntem bölümünde uygulama yöntemi anlatılan bu deneyde elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'de grafize edilmiştir.

Şekil 4.3'den, dört karışım (AÇ+BK, AÇ+B1, PKÇ+GK) hariç, diğerlerinin yayılma çapının hemen hemen KYB Kılavuzu (Anonim 2007)'de verilen SF2 sınıfına (66-75 cm) girdiği görülmektedir. Belirtilen kılavuzda, bu sınıftaki betonların pek çok normal uygulama (örneğin kolonlar ve duvarlar) için uygun olacağı belirtilmektedir. AÇ+BK, AÇ+B1, PKÇ+GK karışımları ise SF1 sınıfına (55-65 cm) girmektedir. Bu sınıftaki betonlar ise salınma noktasından serbest yer değiştirmeye üstten dökülen donatısız ya da çok az donatılı beton yapılar (örneğin konut döşemeleri), pompa enjeksiyon sistemi ile dökme (örneğin tünel kaplaması), uzun yatay akışları engelleyecek kadar küçük

kesitler (örneğin kazıklar ve bazı derin temeller) gibi uygulamalar için kullanılabilir (Anonim 2007).

Şekil 4.3'den, BK katılan karışımlarda en fazla yayılmanın 71 cm ile SDC ve KZÇ'li betonlarda gerçekleştiği bunu birbirlerine oldukça yakın değerlere sahip PÇ ve PKÇ'li karışımların (sırasıyla 66,5 ve 67 cm) izlediği görülmektedir. En küçük yayılma çapı ise AÇ'li betonlarda (63 cm) görülmüştür.



Şekil 4.3. Yayılma çapının agrega ve çimento türüne göre değişimi

NA'lı karışımlarda en büyük yayılma çapı 72 cm ile PÇ'li betonlarda görülmüştür. Bunu KZÇ'li (71 cm) ve SDC'li (69 cm) karışımlar izlemiştir. AÇ ve PKÇ'li karışımlar ise 67 cm ile aynı ve en düşük yayılma çapına sahip betonlardır.

Bazalt agregalı karışımlarda ise yayılma çapı agrega türüne göre kısmi farklılıklar içermektedir. B1 ve B2'li karışımların her ikisinde de en düşük yayılma çapı AÇ'li karışımlarda görülmüş iken (sırasıyla 63,5 cm ve 65,5 cm) en yüksek yayılma çapı B1'li karışımlarda PKÇ ve SDC'li, B2'li karışımlarda ise KZÇ ve SDC'li karışımlarda

görülmüştür. SDÇ'li karışımların her iki agrega türü ile yüksek bir yayılma çapı vermişken KZÇ'li karışımların su emmesi düşük özgül ağırlığı yüksek olan bazaltla (B1) düşük, su emmesi yüksek özgül ağırlığı düşük olan bazaltla (B2) ise yüksek yayılma çapına sahip olması dikkat çekmektedir (Şekil 4.3).

GK kullanılan betonlarda en fazla yayılma 73 cm ile KZÇ'li karışımlarda görülmüştür. Bu yayılma çapı, aynı zamanda, 25 grup numune içinde en yüksek değerdir. Bu karışımı SDÇ ve PÇ'li karışımlar (sırasıyla 68 ve 66,5 cm) bunları da AÇ ve PKÇ'li betonların (sırasıyla 65,5 ve 64 cm) takip ettiği belirlenmiştir.

Her bir agrega türüne göre ortalama alınarak bir değerlendirme yapıldığında; NA'lı olanların 69,2 cm, B2'li karışımların 68,3 cm, BK'lı karışımların 67,7 cm, GK'lı betonların 67,4 cm ve B1'li olanların 67,2 cm'lik ortalama yayılma çaplarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Buradan en büyük yayılma çapına sahip betonların NA'lı karışımlar olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, yukarıda T<sub>500</sub> süreleri ile ilgi bölümde belirtildiği gibi, agreganın yüzey yapısıdır. Yuvarlak ve keskin köşeleri olmayan dere malzemesi kırmataşlara göre daha fazla yayılmıştır. Diğer taraftan, su emmesi yüksek özgül ağırlığı düşük bazalt agregalı (B2) karışımlar diğer kırmataşlı karışımlara göre daha fazla yayılma çapına sahip olmuşlardır. Özgül ağırlıkları birbirine yakın olan kırmataşların (B1= 2,675, BK= 2,69 ve GK = 2,71) yayılma çapları ise bir birine yakın çıkmıştır. (Hatta en yüksek özgül ağırlığa sahip olan agrega olan GK'nin kullanıldığı karışımlarda, 25 karışım içinde en yüksek yayılma çapına sahip KZÇ'li karışımın yayılma çapı çıkarıldığında, ortalama yayılma çapı 66 cm'e düşmektedir). Buradan, KYB'nin yayılması üzerinde agregaların hem yüzey topografyasının hem de özgül ağırlıklarının etkisi olduğu sonucu çıkmaktadır.

Çimento türüne göre bulunan ortalamalarda ise en büyük yayılma çapı, birbirlerine yakın değerlerle, KZÇ'li ve SDÇ'li karışımlarda (sırasıyla 70,2 ve 69,6 cm) ölçülmüştür. Bunları PÇ (68,0 cm) ve PKÇ'li (67,1 cm) karışımlar izlemiştir. En az yayılma ise 64,9 cm ile AÇ'li betonlarda görülmüştür.

KZÇ'li çimentoların en düşük özgül ağırlık (2.92) en yüksek incelik (4459 cm<sup>2</sup>/g) sahip olduğu Çizelge 3.2'den görülmektedir. Bu değerler yukarıdaki ortalamalarla birlikte değerlendirildiğinde KZÇ'li karışımların yüksek ortalama yayılma çapına sahip olmasında düşük özgül ağırlık ve yüksek inceliğe sahip olmasının etkisi olduğu sonucu çıkarılabilir. Yine, AÇ'li karışımların en düşük ortalama yayılma çapına sahip olması bu çimento tipinin en yüksek özgül ağırlık (3.22) ve en düşük incelik (3150 cm<sup>2</sup>/g) değerine sahip olması ile açıklanabilir. Ancak bu sonuçları genelleştirmek mümkün olamamıştır. Nitekim, KZÇ ile benzer değerlere sahip olan PKÇ'li (özgül ağırlık =2,94, incelik= 4403 cm<sup>2</sup>/g) karışımların özgül ağırlığı 3,16, inceliği 3290 cm<sup>2</sup>/g olan SDC'li karışımlardan daha düşük ortalama yayılma çapına sahip olması bu sonuçla çelişmektedir. Bu nedenle, KYB'lerin yayılma süresinde olduğu gibi yayılma çapı üzerinde de başka faktörlerin etkin olduğunu söylemek mümkündür. Burada da yine, öncelikle, kimyasal katkı-çimento etkileşimi üzerinde durmak gerekir.

Çalışmada KYB'lerin yayılma çapının hem agregası hem de çimento tipine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. İki parametre birlikte ele alındığında en büyük yayılma çapına (73 cm) KZÇ+GK içeren karışımların, en düşük yayılma çapına ise AÇ+B1 (63,5 cm) ve AÇ+BK (63 cm) içeren betonların sahip olduğu tespit edilmiştir. En büyük yayılma çapına göre azalma oranı %13'dür.

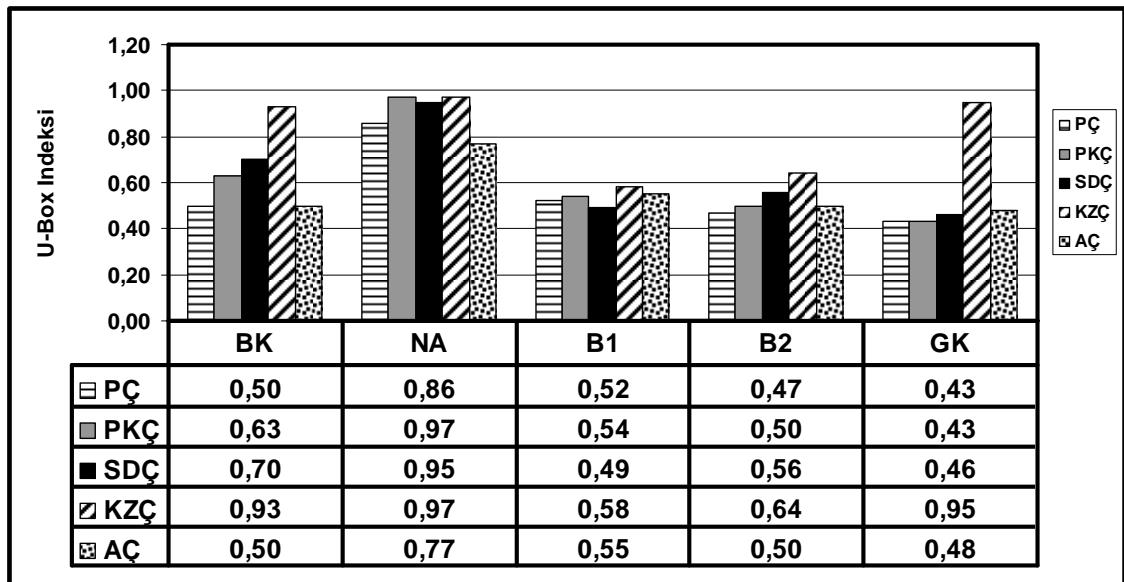
#### **4. 1. 2. 3. U-Kutusu deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi**

KYB'lerin geçme yeteneğini belirleme yöntemlerinden biri de U-Kutusu deneyidir. Geçme yeteneği taze karışımın yoğun donatılı bölgeler gibi sarılmış boşluklardan ve dar açıklıklardan ayrışma olmadan, üniformalık kaybı olmadan ya da tıkanmaya sebep olmadan akma kapasitesidir. Geçme yeteneğini tanımlarken, donatının geometrisi ve yoğunluğunu, akıcılık/doldurma yeteneği ve maksimum agregası boyutunu dikkate almak gereklidir (Anonim 2007).

KYB Kılavuzu (Anonim 2007)'de U-Kutusu deneyi sonuçlarının değerlendirilmesine yönelik herhangi bir kriter verilmemiştir. Bundan dolayı U-Kutusu deneyi sonuçlarının

değerlendirilmesi Gurjar (2004)'de verilen U-Kutusu İndeksi ( $I_u$ )'ne göre yapılmıştır. Belirtilen kaynakta bu indeks: “betonun yerleşmesi durduktan sonra U kutusunun iki bölmesindeki betonların yükseklikleri arasındaki oran” olarak tarif edilmiştir. İndeksin 1 olması betonun kendiliğinden seviyelendiğini gösterir. Gurjar (2004) U-Kutusu İndeksi'nin 0,8 veya daha yüksek değerlerde olması durumunda ise kendiliğinden yerleşen betonun mükemmel akışkanlığa sahip olacağını bildirmiştir.

U-Kutusu deneyinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'de grafize edilmiştir.



Şekil 4.4. Geçme yeteneğinin agrega ve çimento türüne göre değişimi

Şekil 4.4'den, BK'lı karışımlarda en iyi geçme yeteneğine  $I_u=0,97$  değeriyle KZÇ'li karışımların sahip olduğu görülmektedir. SDÇ'li ve PKÇ'li betonların birbirine yakın değerlere (sırasıyla  $I_u=0,7$  ve  $I_u=0,63$ ) sahip oldukları gözlemlenmiştir. AÇ ve PÇ'li betonlar ise aynı indekse ( $I_u=0,5$ ) sahip olup bu gruptaki geçme yeteneği en düşük karışımları oluşturmuşlardır.

NA'lı karışımlar ise bütün agrega türleri içinde yüksek indeks değerlerine ulaşmışlardır. PKÇ ve KZÇ'li betonların aynı değere ( $I_u=0,97$ ) sahip oldukları bunları  $I_u=0,95$  ile



SDÇ'li karışımların izlediği Şekil 4.4'den görülmektedir. PÇ'li betonlar  $I_u=0,86$  ve AÇ'li betonlarda ise  $I_u=0,77$  değerini almışlardır. Görüldüğü gibi, AÇ'li olanlar hariç (ki bunlarda çok uzak değere sahip değil), bu agrega ile üretilen betonlar Gurjar (2004)'de belirtilen KYB'nin sahip olması gereken akışkanlığa sahiptir.

Bazaltlı karışımlarda ise birine yakın sonuçlar elde edilmiş olup çimento tipindeki değişikliğin sonuçları pek fazla etkilemediği görülmüştür. Su emmesi düşük olan bazaltla (B1) üretilen karışımların U-Kutusu İndeksi 0,49-0,58 arasında değişmiştir. Su emmesi yüksek olan bazaltla (B2) üretilen karışımlarda ise U-Kutusu İndeksi değeri, KZÇ'li karışımlar ( $I_u=0,64$ ) hariç, 0,47-0,56 arasında değişmiştir. Buradan bazalta üretilen betonlarda en iyi geçme yeteneğine KZÇ+B2'li betonların sahip olduğu söylenebilir.

GK ile üretilen betonlarda ise oldukça ilginç sonuçlara ulaşılmıştır. KZÇ ile üretilen karışımlar çok yüksek indeks değerine ( $I_u=0,95$ ) sahipken diğer betonların indeksleri 0,43-0,48 arasında değişmiştir. Buradan KZÇ'li betonların geçme yeteneği açısından mükemmel akışkanlığa sahip olduğu, buna karşın, diğer çimento tipleriyle üretilenlerin KYB'den beklenen geçme yeteneğine sahip olmadığı sonucu çıkmaktadır.

Her bir agrega türüne göre ortalama alınarak bir değerlendirme yapıldığında en iyi geçme yeteneğine 0,90 değeriyle NA'lı betonların sahip olduğu görülmüştür. Bunu 0,65 değeriyle BK'lı betonlar izlemiştir. Geriye kalan karışımların (B2, B1, GK) ise birbirlerine oldukça yakın değerlere (sırasıyla 0,53; 0,54; 0,55) sahip oldukları tespit edilmiştir. GK karışımlarda anomali olan KZÇ'li olanlar çıkartıldığında ortalama 0,45'e düşmektedir. Buradan üretilen betonların geçme yeteneğini en iyi normal agregaların (NA) en kötü ise gri kalkerin (GK) sağladığını söylemek mümkündür. Normal agreganın yüzey pürüzlüğünün düşük olması ve kırmataşa nispeten daha küresel yapıya sahip olması KYB'nin geçme yeteneği üzerinde oldukça etkili olmuştur. Diğer taraftan, GK'in diğer kırmataş agregalardan farkı özgül ağırlığının daha fazla olmasıdır. Buradan da özgül ağırlık artıkaça geçme yeteneğinin zayıfladığı sonucuna varılabilir.

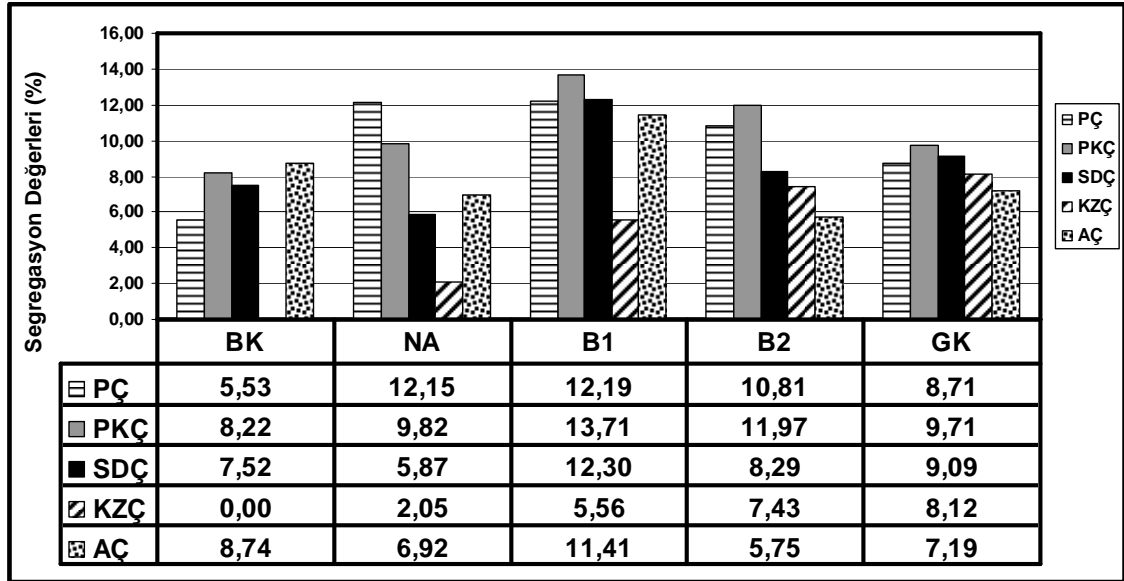
Çimento türüne göre bulunan ortalamalarda ise en iyi geçme yeteneği 0,81 değeriyle KZÇ'li betonlarda görülmüştür. Bunu oldukça yakın değerlere sahip PKÇ ve SDC'li betonlar (sırasıyla 0,61 ve 0,63) bunları da birbirleriyle hemen hemen aynı değerlerle PÇ ve AÇ'li betonlar (sırasıyla 0,56 ve 0,57) izlemiştir. Çizelge 3.2'den görülebileceği gibi KZÇ diğer çimentolardan hem özgül ağırlık hem de incelik olarak farklıdır. Bütün çimento tipleri içinde 4459 cm<sup>2</sup>/g ile en yüksek inceliğe 2.92 değeri ile de en düşük özgül ağırlığa sahiptir. KZÇ'li karışımların Gurjar (2004)'de KYB'nin geçme yeteneği için belirtilen alt sınır olan 0.8 değerinin üstünde geçme yeteneğine sahip olmasına bu faktörlerin neden olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan, bütün çimentolar için iyi bir geçme yeteneği gösteren NA'lı karışımlar göz önünde bulundurulmadan yapılan ortalama ise KZÇ'li karışımlar 0.775 ile en yüksek indeks değerine sahipken diğer çimentolar 0.48-0.55 arasında değerlere sahip oldukları görülmüştür. Buradan kırmataş agregalı karışımlarda yine en iyi geçme yeteneğine KZÇ'li olanların sahip olduğu diğer çimentolu karışımların ise KYB'den beklenen geçme yeteneğinin altında kaldıkları söylenebilir.

Son iki paragraftan hareketle bir optimizasyon yapılacak olursa en iyi geçme yeteneğine KZÇ+NA'lı karışımların sahip olduğu söylenebilir. Nitekim, Şekil 4.4'den, bu indeks değerinin 0,97 olduğu görülmektedir. PKÇ+NA betonlar da aynı indekse sahiptirler (Şekil 4.4). Burada KZÇ'den sonra en yüksek incelik değerine (4403 cm<sup>2</sup>/g) ve en düşük özgül ağırlığa (2,94) PKÇ'nin sahip olduğunu söylemek gerekir.

#### **4. 1. 2. 4. Elek ayrışması deneyinin değerlendirilmesi**

KYB'de yerleştirme sırasında ve yerleştirmeden sonra fakat sertleşmeden önce de ayrışma (segregasyon) problemi olabilir. Yerleştirmeden sonra oluşan ayrışma uzun elemanlarda çok zararlı olacaktır ve ince döşemelerde bile çatlama ya da zayıf yüzey gibi yüzey kusurlarına sebep olabilir. Ayrışma direnci, daha yüksek çökme-akma sınıflarıyla ve/veya daha düşük viskozite sınıfıyla ya da eğer yerleştirme şartları ayrışmayı iletmiyorsa önemli bir parametre olur (Anonim 2007).

KYB üzerinde yapılan çalışmalarda betonun ayrışma direnci Çizelge 1.1’de belirtilen deney yöntemleri sonunda elde edilen ayrışma oranı ile değerlendirilir. Bu çalışmada KYB’lerin ayrışma direnci elek ayrışması deneyi ile incelenmiş olup deneyde elde edilen sonuçlar Şekil 4.5’de grafize edilmiştir.



**Şekil 4.5.** KYB’lerin ayrışma direncinin agrega ve çimento türüne göre değişimi

Şekil 4.5’den de görüldüğü gibi, bütün beton karışımlarının segregasyon oranları %15’in altındadır. Bu nedenle bütün beton grupları KYB Kılavuzu (Anonim 2007)’de verilen SR2 sınıfına girmektedir. Bu sınıfa giren karışımlar, düşey durumlarda akma mesafesi 5 m’den fazla ve sargı aralığı 80 mm’den daha büyük olan durumlarda tercih edilmektedir.

Yine Şekil 4.5.’den, BK karışımlarda en fazla ayrışmanın birbirine yakın değerlerle AÇ ve PKÇ’li betonlarda (sırasıyla %8,74 ve %8,22) gerçekleştiği bunu SDÇ (%7,52) ve PÇ’li (%5,53) betonların izlediği görülmektedir. KZÇ’li karışımlarda ise hiçbir ayrışma görülmemiştir.

NA'lı karışımlarda en fazla ayrışma %12,15 ile PÇ'li karışımlarda görülmüştür. Bunu %9,82 değeriyle PKÇ'li betonlar izlemiştir. Geriye kalanlardan AÇ ve SDC'li karışımlar birbirlerine yakın değerlere (sırasıyla %6,92 ve %5,87) sahiptirler. En az ayrışma ise % 2,05 ile KZÇ'li betonlarda gözlemlenmiştir.

B1'li karışımlarda en az ayrışma %5,56 ile KZÇ'li betonlarda en fazla ayrışma ise %13,71 ile PKÇ'li betonlarda görülmüştür. Diğer karışımlar ise %12,30 ve %11,41 arasında değer almışlardır. Diğer taraftan, çalışmada üretilen 25 karışım içerisinde, KZÇ+B2 ve KZÇ+GK hariç, her bir çimento tipinde B1 ile üretilen betonların daha fazla ayrışma gösterdiği tespit edilmiştir. B2 kullanılan betonlarda da en fazla ayrışma %11,97 ile PKÇ'li karışımlarda görülmüştür. Bunu PÇ ve SDC'li karışımlar (sırasıyla %10,81 ve %8,29) bunları da KZÇ ve AÇ'li betonlar (sırasıyla %7,43 ve %5,75) takip etmiştir.

Diğer taraftan, GK içeren karışımlarda en fazla ayrışma %9,71 ile PKÇ'li betonlarda görülmüş iken SDC, PÇ ve KZÇ'li karışımların bir birlerine yakın (sırasıyla %9,09, %8,71 ve %8,12) olduğu ve AÇ'li karışımların ise %7,19 ile en az ayrılmaya sahip olduğu görülmüştür.

Her bir agrega türüne göre ortalama alınarak bir değerlendirme yapıldığında ise BK'lı karışımların %6,00, NA'lı olanların %7,36, GK'lı betonların %8,57, B2'li karışımların %8,85 ve B1'li karışımların %11,03'lik değerlere sahip oldukları tespit edilmiştir. Bu değerler dikkate alındığında en iyi ayrışma direncinin BK'lı karışımlarda ve en fazla ayrışmanın ise B1'li karışımlarda görüldüğü söylenebilir. Buradan yukarıda KYB'nin üç temel özelliğini (viskozite, akıcılık ve geçme yeteneği) belirlemek için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlardan farklı bir sonuçla karşılaşıldığı görülmektedir. Söz konusu deneylerin her üçünde de yuvarlak agrega (NA) en iyi performansı göstermiş iken ayrışma direncinde beyaz kalker (BK) daha iyi sonuç vermiştir. Betonlar üretilirken kullanılan filler malzeme de beyaz kalkerdir. Sonuçlar üzerinde (dolayısı ile KYB'lerin ayrışma direnci üzerinde) filler-iri agrega uyumunun bir etkisi olup olmadığı araştırılmalıdır.

Çimento türüne göre bulunan ortalamalarda ise en iyi ayrışma direnci KZÇ'li betonlarda (%4,63) görülmüştür. Bunu birbirlerine yakın değerlerle SDC'li ve AÇ'li karışımlar (sırasıyla %8,61 ve %8,00) bunları da PÇ'li ve PKÇ'li betonlar (sırasıyla %9,88 ve %10,69) izlemiştir. KZÇ'lerin diğer çimento tipleriyle mukayese edilemeyecek kadar ayrışma direncini artırması dikkat çekmektedir. Bu çimento türü diğer çimentolardan hem özgül ağırlık hem de incelik olarak farklıdır (Çizelge 3.2). Bütün çimento tipleri içinde  $4459 \text{ cm}^2/\text{g}$  ile en yüksek inceliğe 2,92 değeri ile de en düşük özgül ağırlığa sahiptir. Ayrışma direncinin artırılmasında özellikle incelik değerinin etkili olduğu düşünülmektedir. Buna karşın, KZÇ'den sonra en yüksek incelik değerine ( $4403 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) sahip olan PKÇ'nin kullanıldığı karışımlarda en düşük ayrışma direncinin tespit edilmesi ilginç bulunmuştur. Bu nedenle çimentoları oluşturan hammaddelerin KYB'lerin ayrışma dirençleri üzerinde etkileri olup olmadığı da ayrıntılı olarak araştırılmalıdır. Bilindiği gibi KZÇ (CEM V/A) çimentolarda klinker oranı %40-64, yüksek fırın cürufu %18-30 ve puzolan+silissi uçucu kül oranı %18-30 arasındadır. Buna karşın, PKÇ (CEM II/B-M) çimentolarda klinker oranı %65-79 yüksek fırın cürufu+silis dumanı+puzolan+uçucu kül oranı da %21-35 arasındadır (Anonim 2002b). Çalışmada kullanılan CEM V/A çimentosunun klinker oranı %44,30, CEM II/B-M'nin ki ise %64'dür.

Deneyle esnasında AÇ ile üretilen betonlarda diğer betonlardan farklı bir durum gözlemlenmiştir. Bu çimento tipi kullanılarak betonlar üretilip  $T_{500}$  süresi belirlendikten kısa süre sonra ana kütlede etrafında ince malzemelerden oluşan bir halka oluşmuştur (Şekil 4.6. (a)). Yani bir ayrışma gerçekleşmiştir. Ancak bu ayrışma elek ayrışması deneyinde net olarak belirlenememiştir. Çünkü elek ayrışması deneyi yapılırken KYB Klavuzu (Anonim 2007) gereği beklenen 15 dakikanın sonunda bu tabaka adeta beton üzerine yapışıp elekten pek fazla akmamıştır. Betonlar kalıplarına yerleştirildikten sonra da aynı durum gerçekleşmiş olup, Şekil 4.6. (b)'den görülebileceği gibi, sülfatlı ortama maruz kalınca bu tabakalar betondan ayrılmışlardır. Bu durumun nedeni araştırılmalıdır. Ancak bu çalışmada, üretici firmanın söz konusu çimentonun know-how teknolojisi ile üretilmesini gerekçe göstererek, ürün hakkında ilave bilgiler vermemesi nedeniyle ayrıntılı analiz yapılamamıştır.



**Şekil 4.6.** AÇ'li karışımlarda görülen ayrışma (a: taze halde, b: sertleşmiş durumda)

Sonuç olarak KYB'lerin ayrışma direncinin de çimento ve agrega tipine bağlı olarak değiştiği söylenebilir. KZÇ+BK karışımı en iyi ayrışma direncini sağlarken PKÇ+B1 karışımı ise en kötü ayrışma direncine neden olmaktadır. AÇ'li karışımlarda ise deneyle tespit edilemeyen ancak gözlemlenen bir ayrışma söz konusudur.

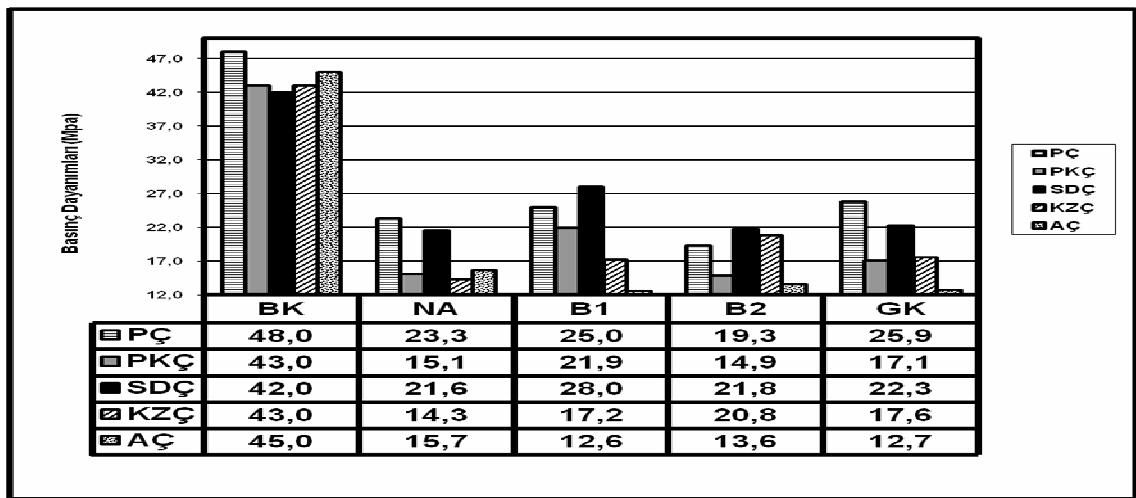
#### **4. 2. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi**

28 günlük numuneler üzerinde yapılmış olan basınç dayanımı deneyinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.7'den, beyaz kalker (BK) kullanılan karışımlarda en büyük basınç dayanımı 48 MPa ile PÇ'li betonda, en düşük dayanım ise 42 MPa ile SDÇ'li betonunda olduğu görülmektedir. Gri kalker (GK) ile üretilen karışımlarda ise en büyük basınç dayanımı 25,9 MPa ile PÇ'li betonda, en düşük basınç dayanımı ise 12,7 MPa ile AÇ'li betonda görülmüştür.

**Çizelge 4.2.** 28 günlük basınç dayanımı deneyi sonuçları

NO	KODU	f (N/mm <sup>2</sup> )	NO	KODU	f (N/mm <sup>2</sup> )
1	PÇBK	48,0	14	SDÇ B1	28,0
2	PKÇBK	43,0	15	KZÇ B1	17,2
3	SDÇBK	42,0	16	PÇNA	23,3
4	KZÇBK	43,0	17	PKÇNA	15,1
5	ABK	45,0	18	SDÇNA	21,55
6	PÇGK	25,9	19	KZÇNA	14,3
7	PKÇGK	17,1	20	ANA	15,7
8	SDÇGK	22,25	21	PÇ B2	19,3
9	KZÇGK	17,6	22	PKÇ B2	14,85
10	AGK	12,7	23	SDÇ B2	21,8
11	PÇB1	25,0	24	KZÇ B2	20,8
12	PKÇ B1	21,9	25	AB2	13,6
13	AB1	12,6			



**Şekil 4.7.** Agrega ve çimento türüne göre beton dayanımlarının değişimi

Bazalt kullanılan karışımlarda ise su emmesi düşük yoğunluğu yüksek olanlarda basınç dayanımının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Düşük su emme değerli bazalt (B1) ile üretilen karışımlarda en büyük basınç dayanımı (28,0 MPa) SDC'li betonda, en düşük basınç dayanımı ise (12,6 MPa) AÇ'li betonda görülmüştür. Yüksek su emme değerine sahip olan bazalt (B2) ile üretilen karışımlarda ise en yüksek dayanım (21,8 MPa) SDC'li betonda, en düşük dayanım ise (13,6 MPa) AÇ'li betonunda görülmüştür.

Normal agregalı (NA) karışımlarda ise en yüksek basınç dayanımı (23,3 MPa) PÇ'li olanlarda en düşük basınç dayanımı (15,7 MPa) ise AÇ'li karışımlarda görülmüştür.

Agrega tipine göre ortalamalar alındığında ise beyaz kalker (BK) ile üretilen KYB'lerin diğer agrega çeşitleri ile üretilenlerin iki katından fazla basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. BK'lı numuneler 44 MPa'lık ortalama basınç değerine sahipken diğer gruplar 17,5-21,0 MPa arasında değişen değerlere sahiptirler: B1=21 MPa, GK=19 MPa, B2=18 MPa ve NA=17,5 MPa. Bu sonuçlardan hareketle aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

1. Kırmataş agregalar dere malzemesine göre basınç dayanımını daha fazla artırmışlardır. Halbuki yukarıdaki bölümlerde de belirtildiği gibi, ayrışma direnci hariç, KYB'nin diğer üç temel karakteristiği (viskozite, akıcılık ve geçme yeteneği) üzerinde dere malzemesi kırmataşlardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Dolayısı ile KYB'lerin taze haldeki üç temel özelliği (viskozite, akıcılık ve geçme yeteneği) ile basınç dayanımı arasında bir ilişkinin olduğunu söylemek güçtür. Ancak, ayrışma direnci en yüksek olan beyaz kalker (BK) ile üretilen betonların aynı zamanda en yüksek basınç dayanımına sahip olması ayrışma direnci ile basınç dayanımı arasında bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Ayrışma direnci yüksek olan KYB'lerin dayanımlarının da yüksek olacağı söylenebilir.

2. Diğer kırmataşlara göre kalker agregalarının daha yüksek dayanım vermesi beklenen bir husustur. Nitekim, Akman (1992) agrega-çimento hamuru arasındaki bağlantının mükemmelliğinin (epitaksi) agreganın mineralojik yapısının bir fonksiyonu olduğunu



ve en iyi bağlantının da kalsiyum karbonatlı kütlelerle olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte beyaz kalkerle gri kalker arasında dayanım farklılığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak da gri kalkerle üretilen betonların ayrışma dirençlerinin beyaz kalkerli betonlara göre daha düşük olması olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, yukarıda belirtildiği gibi, filler-iri agrega uyumunun da araştırılması gerekir.

Diğer taraftan, çimento tipine göre yapılan ortalama hesaplamalarında en yüksek basınç dayanımına 28,3 MPa ile Portland çimentolu (PÇ) karışımların sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunu 27,1 MPa ile SDC'li karışımlar, bunu da birbirleriyle hemen hemen aynı ortalamalara sahip PKÇ ve KZÇ'li karışımlar (sırasıyla 22,6 MPa ve 22,4 MPa) izlemiştir. En düşük basınç dayanımı ortalamasına ise 20 MPa ile Kalsiyum Alüminatlı Çimento'lu (AÇ) karışımlar sahiptir.

Çizelge 3.2'den, çalışmada kullanılan çimentoların 28 günlük dayanımları incelendiğinde en yüksek dayanıma Kalsiyum Alüminatlı Çimento'nun (95 MPa) sahip olduğu bunu Normal Portland Çimentosu (PÇ)'nin izlediği (55,90 MPa) görülmektedir. Ancak yukarıda belirtilen ayrışma nedeniyle AÇ'li karışımların basınç dayanımı beklenenden oldukça düşük çıkmıştır. PÇ'li karışımların diğer çimento tiplerine göre daha yüksek ortalama dayanım değerlerine sahip olması ise beklenen bir husustur.

Sonuç olarak KYB numunelerinin basınç dayanımlarındaki değişimin hem çimento tipinden hem de iri agrega çeşitliliğinden etkilendiği belirlenmiştir. Bu çalışmada en yüksek basınç dayanımı (48 MPa) PÇBK betonunda, en düşük dayanımı ise AB1 (12,6 MPa) ve AGK (12,7 MPa) betonlarında elde edilmiştir.

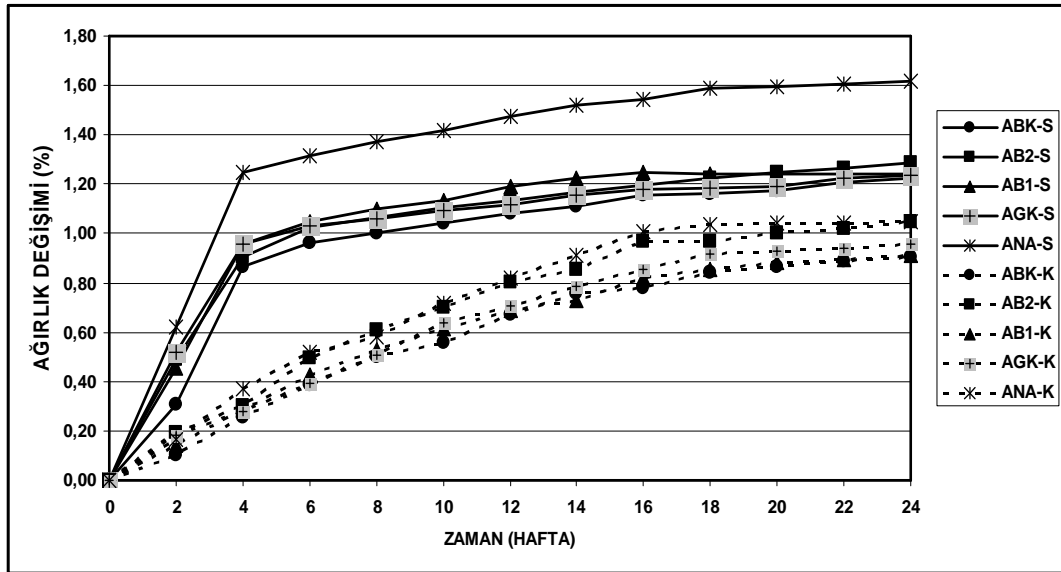
### **4.3. Sülfat Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Bu bölümde, % 10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içeren sülfatlı ortamda saklanan numuneler ile kirece doygun suda bekletilen kontrol grubu numunelerinde zamanla ölçülen değişimler değerlendirilecektir. Bu çalışmada, Persson (2003), Tsivilis *et al.* (2007) ve Amoudi

(1997)'de yapıldığı gibi, sülfata maruz betonların dirençleri kontrol betonlarındaki artışla kıyaslanarak irdelenmiştir.

Devamlı olarak su içerisinde bırakılan betonların hacimlerinde ve ağırlıklarında küçük bir miktar artma meydana gelmektedir (örneğin bir yıl süreyle su içerisinde bekleyen normal betonun ağırlığında %1 kadar artma olabilmektedir). Betonun gösterdiği bu hacim artışına “şişme” veya “negatif büzülme” denilmektedir. Hacim artışının nedeni çimento jelleri tarafından emilen sudur. Su molekülleri jel parçacıklarının arasına girerek bu parçacıkların kohezyonuna karşı koyan bir kuvvet gibi hareket etmekte, şişmeye yol açan bir basınç oluşturmaktadır (Akman 1992; Erdoğan 2003). Bu nedenle kontrol grubu numuneler de suda saklanarak sülfatlı ortamlarda kirece doymun ortamlardan farklı oranda ağırlık artışı olup olmadığı araştırılmıştır.

Çalışmada 6 ay (24 hafta) boyunca belirlenen sülfat çözeltisi içerisinde ve kirece doymun su tanklarında saklanan numunelerde ölçülen ağırlık değişimleri Ek'te verilmiştir. Aşağıda ekte verilen çizelgeden hareketle her bir çimento tipine göre ayrı ayrı grafikler çizilip değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 4.8. Kalsiyum Alüminatlı Çimento (AÇ) içeren kontrol ve sülfat etkisindeki numunelerde görülen ağırlık değişimi yüzdesi

Şekil 4.8'deki eğrilerden görüldüğü gibi 24 hafta boyunca sülfata maruz bırakılan numunelerdeki ağırlık artışı kontrol grubuna göre daha fazla olmuştur. 24. hafta sonu itibari ile de sülfat solüsyonlarına maruz bırakılan numuneler arasındaki en fazla artış %1,62 ile yuvarlak agregaya içeren ANA beton grubunda görülmüş bunu %1,29 ile su emmesi yüksek olan bazalt (B2) içeren AB2 beton grubu izlemiştir. Şekil 4.7'den diğer karışımlardan ABK, AB1 ve AGK karışımlarının birbirlerine oldukça yakın değerlere (sırasıyla %1,22; %1,24; %1,24 ) sahip oldukları görülmektedir.

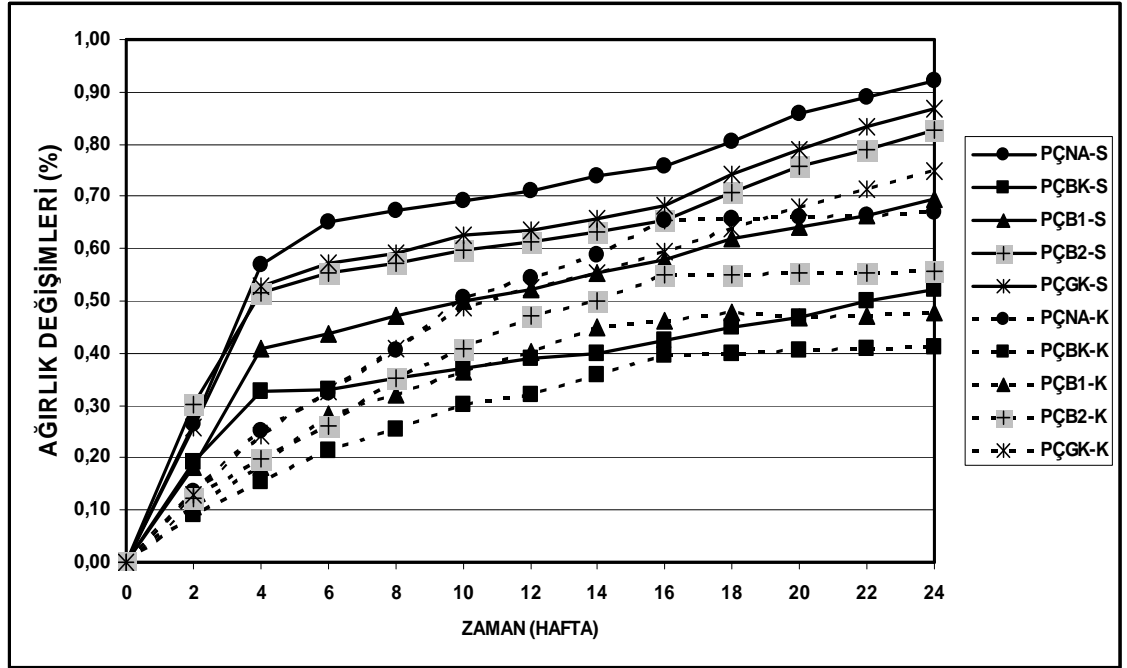
Kontrol numunelerinde ise en fazla değişim %1,05 ile ANA ve AB2 numunelerinde en az ağırlık değişimi % 0,91 ile ABK ve AB1 betonlarında görülmüştür. AGK karışımları ise %0,95 değerini almışlardır.

Diğer taraftan, kontrol grubu numunelerindeki ağırlık artışı 16. haftaya kadar belli bir hızda gerçekleşmiş iken bu haftadan sonra artış hızının biraz düştüğü görülmektedir. Buna karşın sülfata maruz numunelerin ağırlık artış hızının ilk 4 hafta içinde diğerlerinden çok daha fazla olması ilginç bulunmuştur.

Portland Çimentosu (PÇ) içeren KYB'lerde görülen ağırlık değişimleri ise Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu grupta da PÇ ve beş farklı tip agregaya kullanılarak üretilen ve sülfata maruz bırakılan numunelerin (PÇBK ve PÇB1 hariç) kontrol grubuna göre ağırlıklarının daha fazla arttığı ve artış hızının ilk 4 haftada daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. 4. haftadan sonraki artışlar daha düşük hızla devam etmiştir.

24 hafta sonunda ise sülfat solüsyonlarına maruz bırakılan numuneler arasındaki en fazla artış %0,92 ile NA içeren PÇNA betonunda görülmüştür. Bunu %0,87 ile PÇGK ve %0,83 ile PÇB2 betonları izlemiştir. En az artış ise %0,52 ile PÇBK betonunda gözlemlenirken PÇB1 betonu %0,69 değerini almıştır.

Kontrol numunelerinde ise en fazla ağırlık değişimi %0,75 ile PÇGK betonlarında en az değişim ise birbirlerine oldukça yakın değerlerle PÇBK ve PÇB1 betonlarında (sırasıyla %0,41; %0,48) görülmüştür. Bunları %0,56 ile PÇB2 ve %0,67 ile PÇNA izlemiştir.



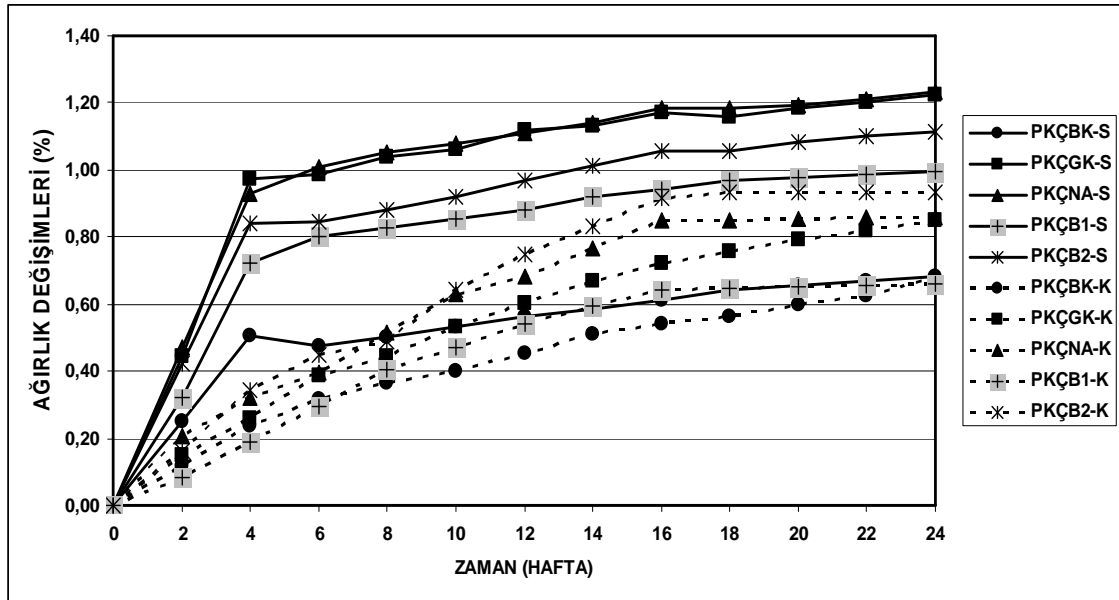
**Şekil 4.9.** Portland çimentosu (PÇ) içeren kontrol ve sülfat etkisindeki numunelerde görülen ağırlık değişimi yüzdesi

Sülfat solüsyonlarına maruz bırakılan numuneler ve kontrol grubu numunelerine ait Şekil 4.10'da verilen grafik incelendiğinde de PKÇ ile üretilen ve sülfata maruz bırakılan numunelerin (PKÇBK hariç) kontrol grubuna göre ağırlıklarının daha fazla arttığı ve en artış hızının ilk 4 haftada daha yüksek gerçekleştiği görülmektedir.

24 hafta sonunda sülfat solüsyonlarına maruz bırakılan numuneler arasındaki en fazla artış hemen hemen aynı değerlerle (%1,23 ve %1,22) PKÇNA ve PKÇGK betonunda görülmüştür. PKÇB2 betonu %1,11 ve PKÇB1 betonu %0,99 değerini almışlardır. En düşük artış ise %0,68 ile PKÇBK karışımında gözlemlenmiştir. Bu beton grubundaki artış 23 hafta boyunca kontrol grubundan daha yüksek seyretmesine rağmen 24 hafta

sonunda aynı oranda buluşmuşlardır. Ayrıca, bu grubun sülfata maruz olanındaki nihai ağırlık artışı diğer grupların kontrollerinden bile düşük olmuştur.

Kontrol numunelerinde ise en fazla ağırlık değişimi %0,93 ile PKÇB2 betonlarında en az değişim ise birbirlerine oldukça yakın değerlerle PKÇBK ve PKÇB1 betonlarında (sırasıyla %0,68; %0,66) görülmüştür. PKÇGK ve PKÇNA karışımları ise hemen hemen aynı (sırasıyla % 0,85 ve %0,86) değeri almışlardır.



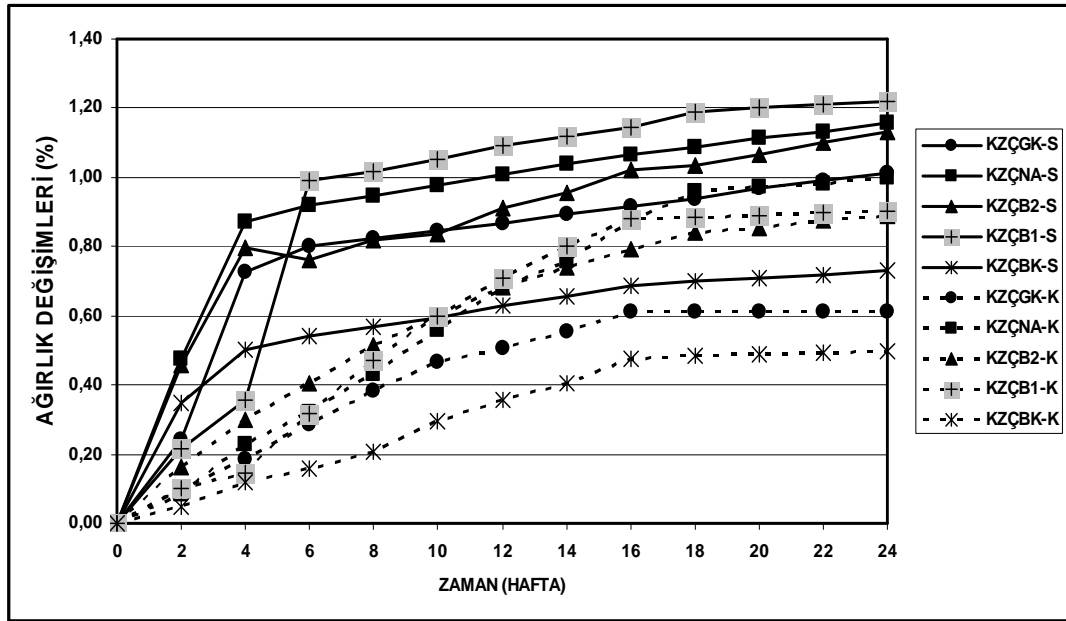
Şekil 4.10. Portland Kompoze Çimento (PKÇ) içeren kontrol ve sülfat etkisindeki numunelerde görülen ağırlık değişimi yüzdesi

KZÇ ile üretilen betonlardaki ağırlık değişimleri ise Şekil 4.11’de verilmiştir. Bu grupta da sülfata maruz bırakılan numunelerin (KZÇBK hariç) kontrol grubuna göre ağırlıklarının daha fazla arttığı ve en fazla artışın ilk 4 haftada olduğu gözlemlenmiştir. Ancak düşük su emme değerine sahip bazalt (B1) ile üretilen grubun sülfata maruz olanının 4. haftadan sonra büyük bir sıçrama yaptığı görülmektedir.

24 hafta sonunda ise sülfat solüsyonlarına maruz bırakılan numuneler arasındaki en fazla artış %1,22 ile KZÇB1 betonunda görülmüştür. Diğer karışımlardan KZÇNA ve

KZÇB2 betonları birbirlerine yakın değerler (sırasıyla %1,16 ve %1,13) almışlardır. Şekil 4.11'den KZÇGK'nın %1,01 oranında artış gösterdiği bu grupta en az artış KZÇBK betonunda gözlemlenmiştir.

Kontrol numunelerinde ise en fazla ağırlık değişimi %0,99 ile KZÇNA betonlarında görülürken bunu birbirlerine oldukça yakın değerlerle KZÇB2 ve KZÇB1 betonları (sırasıyla %0,89; %0,90) izlemiştir. KZÇGK'nın %0,61 oranında arttığı bu grupta en az ağırlık değişimi %0,49 ile KZÇBK karışımında gözlemlenmiştir.

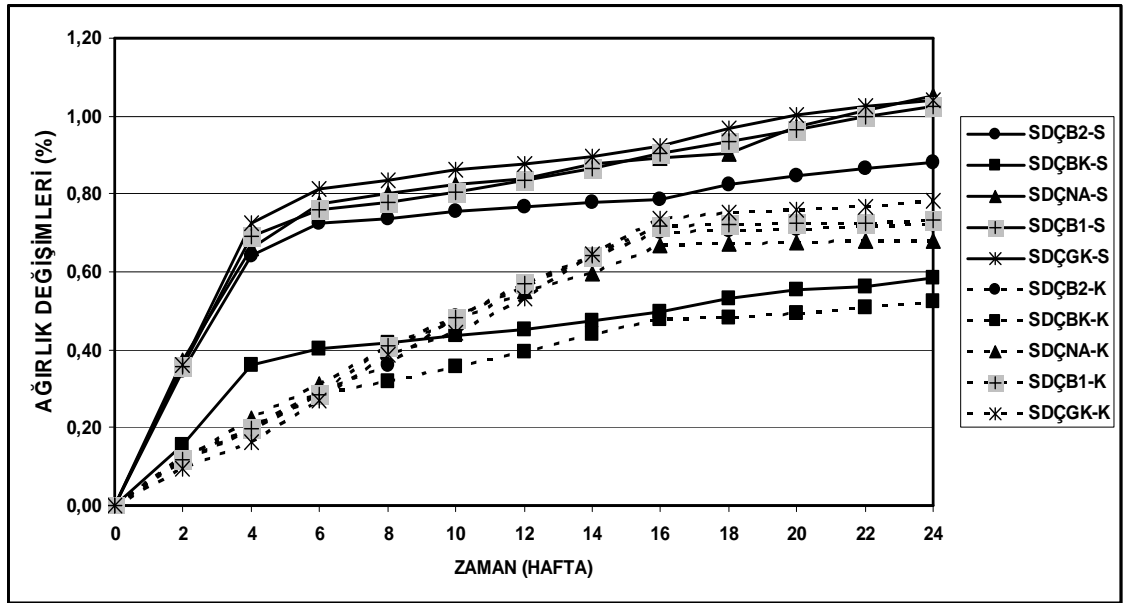


Şekil 4.11. Kompoze Çimento (KZÇ) içeren kontrol ve sülfat etkisindeki numunelerde görülen ağırlık değişimi yüzdesi

Şekil 4.12 ise SDCÇ ile üretilen numunelerdeki ağırlık değişimini göstermektedir. Bu grafikten de görülebileceği üzere sülfat maruz numunelerde (SDÇBK hariç) en fazla artış ilk 4 haftada olmuştur. 4. haftadan sonra bütün gruplardaki artışlar daha düşük hızla devam etmiştir. Kontrol numunelerindeki ağırlık artış hızı ise 16. haftadan sonra biraz düşmüştür.

24 hafta sonu itibari ile ise sülfat solüsyonlarına maruz bırakılan numuneler arasındaki en fazla artış birbirleriyle hemen hemen aynı değere sahip olan SDÇNA, SDÇGK ve SDÇB1 karışımlarında (sırasıyla %1,05; %1,04 ve %1,03) görülmüştür. Bunu % 0,88 ile SDÇB2 karışımı izlemiştir. En düşük değer ise %0,56 ile SDÇBK karışımında görülmüştür.

Kontrol numunelerinde ise en fazla ağırlık değişimi birbirleriyle hemen hemen aynı değere sahip olan SDÇGK, SDÇB1 ve SDÇB2 karışımlarında (sırasıyla %0,78; %0,73 ve %0,72) görülmüştür. Bunu %0,68 ile SDÇNA karışımı izlemiştir. En düşük değer ise %0,53 ile SDÇBK karışımında görülmüştür.



**Şekil 4.12.** Sülfata Dayanıklı Çimento (SDÇ) içeren kontrol ve sülfat etkisindeki numunelerde görülen ağırlık değişimi yüzdesi

Şekil 4.8-4.12’de verilen grafiklerden hareketle 24 hafta sonu itibari ile karışımlarda görülen ağırlık artışı hem sülfata maruz (Çizelge 4.3) hem de kontrol numuneleri (Çizelge 4.4) için aşağıda topluca gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3.** %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ortamında 24 hafta saklanan numunelerde başlangıç ağırlıklarına göre gerçekleşen ağırlık artışı (%)

		ÇİMENTO TİPİ					Ortamala
		PÇ	PKÇ	KZÇ	SDÇ	AÇ	
A G R E A	NA	0,92	1,23	1,16	1,05	1,92	1,20
	B2	0,83	1,11	1,13	0,88	1,29	1,05
	B1	0,69	0,99	1,22	1,03	1,24	1,03
	BK	0,52	0,68	0,73	0,56	1,22	0,74
	GK	0,87	1,22	1,01	1,04	1,24	1,08
Ortamala		0,77	1,05	1,05	0,91	1,32	

**Çizelge 4.4.** Kirece doymun su ortamında 24 hafta saklanan numunelerde başlangıç ağırlıklarına göre gerçekleşen ağırlık artışı (%)

		ÇİMENTO TİPİ					Ortamala
		PÇ	PKÇ	KZÇ	SDÇ	AÇ	
A G R E A	NA	0,67	0,86	0,99	0,68	1,05	0,85
	B2	0,56	0,93	0,89	0,72	1,05	0,83
	B1	0,41	0,66	0,90	0,73	0,91	0,72
	BK	0,48	0,68	0,49	0,53	0,91	0,62
	GK	0,75	0,85	0,61	0,78	0,95	0,79
Ortamala		0,57	0,80	0,78	0,70	0,97	

Bu çizelgelerden hareketle KYB'lerin sülfat direnci ile ilgili aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

1- Aynı çimento tipi ancak farklı iri agrega çeşidi ile üretilen KYB'lerin ağırlık artışlarındaki değişim agrega tipine bağlı olarak değişmektedir. Bu hem sülfatlı ortamda hem de kirece doymun su için geçerlidir. Ancak sülfatlı ortamdaki ağırlık değişimi kontrol numunelerinkinden daha fazla olmuştur. Nitekim, 24. hafta sonunda ölçülen ağırlık artışlarının çimento tipine göre ortalaması alındığında değişimin; sülfatlı ortamlarda %0.77-%1.32 arasında, kontrol numunelerinde ise %0.57-%0.97 arasında gerçekleştiği bulunmuştur. İri agrega çeşidine göre ortalama alındığında da yaklaşık oranlar elde edilmiştir: sülfatlı ortamlarda %0.74-%1.20, kontrol numunelerinde %0.62-%0.85 arasındadır. Persson (2003) de bu çalışmadaki üretim yöntemine benzer yöntemle ürettiği KYB numunelerini 300 gün boyunca sodyum sülfatlı ortamda



beklettikten sonra hem kontrol hem de sülfata maruz bırakılanlarda ağırlık artışı olduğunu ve sülfatlı ortamdakilerin kontrol numunelerinden biraz daha fazla ağırlık artışına sahip olduğunu belirlemiştir.

Bu alt bölüme girerken açıklandığı gibi kirece doygun sularda saklanan numunelerde de ağırlık artışının olması beklenir. Ancak sülfatlı ortamlarda saklanan KYB'lerin ağırlıklarının daha fazla artması bu betonlarda sülfat etkisinin görüldüğünü göstermesi açısından anlamlıdır.

2- İri agrega çeşidi açısından yapılan değerlendirmede ağırlık artışının agrega çeşidine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Sülfatlı ortam için agrega türü sabit alınıp çimento tipi değiştirilerek bulunan ortalamalarda en az ağırlık değişiminin %0,74 ile beyaz kalkerde (BK) en yüksek ise normal agregada (%1,20) görüldüğü tespit edilmiştir. Bazaltlar (B1 ve B2) ve gri kalker (GK)'li olanlar ise birbirine yakın ortalamalara sahip olmuşlardır (sırasıyla %1,03; %1,05 ve %1,08).

Bu sonuç KYB'nin temel karakteristikleri ile ilişkilendirildiğinde şu değerlendirme yapılabilir: yayılma süresi (viskozite), yayılma çapı ve geçme yeteneğinde en iyi sonuçları veren NA'nın sülfata maruz ortamlarda en iyi sonucu vermemiştir. Buna karşın, ayrışma direncinde en iyi sonucu veren beyaz kalker (BK) sülfatlı ortamlarda da en iyi sonucu vermiştir. Buradan, temel karakteristiklerden olan ayrışma direncinin KYB'nin sülfat direnci özelinde durabilite özelliklerini etkileyeceği/belirleyebileceği sonucuna varılabilir. Bununla birlikte, ayrışma direncinde ikinci en iyi sonucu veren NA'nın sülfatlı ortamlarda en kötü sonucu vermesi ise ilginç bulunmuştur.

3- Çimento tipine göre bulunan ortalamalarda en yüksek ağırlık artışı %1,32 ile Kalsiyum Alüminatlı Çimento'larda en düşük ise %0,77 ile Portland Çimento'larında görülmüştür. Diğer çimentolardan KZÇ ve PKÇ aynı (%1,05), SDC ise %0,91 oranında ortalama ağırlık artışı göstermiştir.

AÇ'li karışımların sülfattan en fazla etkilenmesi, taze beton deneylerinde de (alt bölüm 4.1.2.4) açıklandığı gibi, bu çimento ile üretilen betonlarda açıkça görülen ancak deneylerle tam tespit edilmeyen ayrışmadır (Şekil 4.6).

Diğer taraftan, Kuramsal Temeller bölümünde de anlatıldığı gibi, sülfatlı ortamlarda bulunan betonun davranışını belirleyen ana etkenlerden biri de çimento tipidir. (2.3) ve (2.4) no.'lu formüllerden görülebileceği gibi sülfat hasarına yol açan  $C_3A$  ve  $(Ca(OH)_2)$  bileşenleri direkt yada hidrasyon sonucu çimentodan gelmektedir. Bu nedenle, normal betonların sülfat direnci üzerine yapılan onlarca çalışmada  $C_3A$  oranı yüksek olan ya da fazla miktarda  $(Ca(OH)_2)$  oluşmasına yol açan çimento tiplerinin betonun sülfat direncini düşürdüğü belirtilmiştir. Bu nedenle de ASTM C 150 (Anonymous 2007)'da sülfata dayanıklılık koşulu olarak  $C_3A$ 'yı %5'le,  $2C_3A+C_4AF$ 'yi de %25 ile sınırlandırmıştır.

Bu çalışmada sülfat direnci ile ilgili elde edilen bulgular bu açıdan analiz edildiğinde literatürde belirtilen sonuçlarla (ki bu sonuçlara Kaynak Özetleri ve Kuramsal Temeller bölümünde değinilmiştir) çelişildiği görülmüştür. Şöyle ki, Çizelge 4.3 ve 4.4'den, hem sülfatlı ortamda saklananlarda hem de kontrol numunelerinde en az ağırlık artışının PÇ'li karışımlarda gerçekleştiği görülmektedir (sülfata maruz: %0,77; kontrol: %0,57). Halbuki, Çizelge 3.2'den, hem  $C_3A$  hem de  $C_4AF$  oranı en yüksek olan çimentoların PÇ olduğu görülmektedir. Dahası, bu çimento tipinin sülfat reaksiyonlarında önemli bir rolü bulunan  $Ca(OH)_2$ 'i oluşturan  $C_3S$  ve  $C_2S$  oranları da diğerlerinden fazladır. Bu nedenlerden dolayı, sülfata maruz ortamlarda saklanan PÇ'li karışımlarda diğerlerine göre daha fazla ağırlık artışı olması beklenirdi. Nitekim literatürde de (örneğin Kasap vd 2007) PÇ'nin sülfatlı ortamlar için uygun olmadığına dair oldukça fazla çalışma vardır. Ancak, sonuçlar beklenenin aksine çıkmıştır. Bunun nedeni şu şekilde açıklanabilir:

Çalışmada elde edilen sonuçları çimentoların ana bileşenlerinin oranları (özellikle  $C_3A$  oranı),  $C_3S/C_2S$  oranı, alümin modülü gibi oksit oranları ya da hidrasyon ürünlerinin çeşidi veya miktarı (özellikle  $Ca(OH)_2$ ) açısından analiz etmek doğru değildir. Çünkü 24 haftada gerçekleşen ağırlık artışlarını belirleyen ana etken betonların geçirimsizlikleri olmuştur.

Bu çalışmada KYB'lerin geçirimsizlikleri araştırılmamıştır. Ancak, basınç dayanımından hareketle (dolaylı olarak) bir geçirimsizlik analizi yapılacak olursa çimento tipine göre en yüksek ortalama basınç dayanımına sahip olan karışımların PÇ (28.3 MPa) ve daha sonra da SDC'li (27.1MPa) karışımlar oldukları Bölüm 4.2'de belirtilmişti. Çizelge 4.3 ve 4.4'de de en az ağırlık artışı önce PÇ'li daha sonra da SDC karışımlarda olduğu görülmektedir. Aynı durum agrega için de geçerlidir. Şekil 4.7'den, iri agrega çeşidine göre en yüksek ortalama basınç dayanımına sahip olan karışımların açık farkla BK'lı (44MPa) karışımlar olduğu görülmektedir. Çizelge 4.3 ve 4.4'den, sülfata tabi olanlarda çok daha bariz olmakla birlikte, BK'lı karışımlarda en az ağırlık artışı olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan, 24 hafta sonu itibari ile, KYB'lerin sülfattan etkilenmesinde çimentonun kimyasal içeriğinden ziyade betonların geçirimsizliklerinin belirleyici olduğu kesin olarak söylenebilir. Bu sonuç da, gerek AC1 318-05 (Anonymous 2005) gerekse de TS EN 206-1 (Anonim 2002a)'de sülfata maruz kalacak betonlar için ortamın şiddeti arttıkça su/çimento oranının da azaltılması (diğer bir ifadeyle geçirimsizliği daha düşük beton üretilmesi) gerektiğini desteklemektedir. Yine TS EN 206-1'de zararlı kimyasal ortamın etkisinin artması durumunda çimento dozajının artırılması hatta basınç dayanımının yüksek tutulmasının önerilmesi bile geçirimsizliği düşük beton üretme hedefine yöneliktir. Baradan (2002) de "betonun geçirimsizliğinin sülfata dayanıklılıkta çimentonun kimyasal yapısından daha etkili bir faktör" olduğunu belirtmektedir.

4- KYB'ler üzerinde sülfat etkisini net olarak belirlemek için 24 haftalık zaman dilimi yetersiz kalmaktadır. Sürenin yıllara varacak şekilde uzun tutulması gerekmektedir. Zaman ilerledikçe çimentoların etkileri de daha somut olarak görülecektir. Başlangıçta sülfat etkisi ile oluşan ürünlerin öncelikle ortam içindeki boşlukları doldurması söz konusudur. Bu aşamadan sonra kristal büyümeleri boşluk çeperlerine basınç uygulayıp çatlak oluşmasına yol açacak ya da var olan çatlakların büyümesini sağlayacaktır. Nitekim, Persson (2003) de KYB'nin sülfat direnci üzerine yaptığı çalışmasında 300 gün sonunda hasarı net olarak belirleyememiş 900 gün sonrasında bile ancak bazı numunelerde gözlemleyebilmiştir. Bu çalışmada da 180 gün boyunca hiçbir numunede çatlak oluşumu ya da pullanma şeklinde bir malzeme kaybı görülmemiştir. (Yalnızca

AÇ'li karışımların üst yüzeyinde pullanma şeklinde bir kayıp söz konusu olmuştur. Bunun da segregasyon nedeni ile olduğu elek ayrışması deneyinin sonuçları değerlendirilirken belirtilmişti.) Bu çalışmada belirlenen sürede (24 hafta) hasarın gözlenememiş olmasında su/çimento oranının düşük (su/bağlayıcı oranı 0,39) olmasının da etkisi olduğu düşünülmektedir. Beton teknolojisinde bu oran geçirimsizliği belirleyen en önemli faktör olarak değerlendirilir. Ayrıca, Dilek ve Tokyay (2007)'de aksi sonuç bulunmasına rağmen, Kasap vd (2007) ve Şahmaran vd (2006)'da da belirtildiği gibi sülfat etkisindeki betonların su/çimento miktarı düştükçe hasar miktarı da azalır.

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

KYB'lerin taze haldeki temel karakteristikleri ve sülfat direnci üzerine çimento tipi ve iri agrega çeşitlerinin etkisini belirlemeye yönelik olarak yapılan bu çalışmada varılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1- KYB'lerin dört temel karakteristiğinden biri olan viskozitenin belirlenmesi için yapılan deneyde nispeten küresel ve köşesiz yapıya sahip yuvarlak agregalı betonların kırmataş agregalılara göre daha hızlı yayıldığı belirlenmiştir. Bu nedenle, viskozitesi düşük KYB'lerin istenildiği yerler için yuvarlak agreganın kullanılması doğru bir seçim olacaktır.

2. Aynı jeolojik kökene sahip olsa bile agregaların özgül ağırlığı KYB'nin viskozitesi üzerinde etkilidir. Özgül ağırlığı düşük olan agregalarla üretilen KYB'lerin daha düşük viskoziteye sahip oldukları görülmüştür.

3- KYB'lerin viskozitesi üzerinde çimentoların özgül ağırlık ve incelik değerlerinin etkisi net olarak belirlenememiştir. Yeni nesil kimyasal katkı maddelerinin çimento ile etkileşimi üzerinde ayrıntılı araştırmalar yürütülüp bu parametrelerin KYB'nin viskozitesi üzerindeki etkisi netleştirilmelidir.

4- Farklı çimento tipleri ve farklı iri agrega çeşitleri kullanılarak viskoziteleri birbirinden oldukça farklı KYB'lerin elde edilmesi mümkündür. Sülfata Dayanıklı Çimento (SDÇ) + yuvarlak agrega (NA)'lı karışımlar en kısa yayılma sürelerine sahiptir. Dolayısı ile düşük viskozite değerlerinin arandığı yerler için bu karışımların uygun olacağını söylemek mümkündür. Kalsiyum Alüminatlı Çimento (AÇ) + Gri Kalker (GK) ile üretilen KYB'lerin ise viskozitesi yüksek olacaktır.

5- KYB'nin yayılması (akıcılık özelliği) üzerinde agregaların hem yüzey topografyasının hem de özgül ağırlıklarının etkisi vardır. Yuvarlak agregalı betonlar

kırmataş agregalarına, özgül ağırlığı düşük agregalı olanlar ise yüksek olanlara göre daha iyi yayılmışlardır.

6- KYB'lerin viskozitesi üzerinde olduğu gibi akıcılık özelliği üzerinde de çimentoların özgül ağırlık ve inceliğinden yola çıkarak kesin bir sonuca ulaşmak mümkün olmamıştır.

7- KYB'lerin akıcılık özelliği hem agrega hem de çimento tipine bağlı olarak değişmektedir. İki parametre birlikte ele alındığında en yüksek akıcılık değerine Kompoze Çimento (KZÇ) + Gri Kalker (GK)'li karışımların, en düşük akıcılık değerine ise Kalsiyum Alüminatlı Çimento (AÇ) + yüksek özgül ağırlığa sahip Bazalt (B1) ya da Beyaz Kalker (BK)'li betonların sahip olduğu tespit edilmiştir.

8- KYB'lerin geçme yeteneğini en iyi yuvarlak agregalar (NA) en kötü ise Gri Kalker (GK) sağlamıştır. Yuvarlak agreganın yüzey pürüzlülüğünün düşük olması ve kırmataşa nispeten daha küresel yapıya sahip olması KYB'nin geçme yeteneği üzerinde oldukça etkili olmuştur. Ayrıca agrega özgül ağırlığı arttıkça betonun geçme yeteneğinin zayıfladığı sonucuna varılmıştır.

9- KYB'lerin geçme yeteneği üzerinde Kompoze Çimento (KZÇ) diğer çimento tiplerinden çok daha iyi sonuç vermiştir. Bu çimento tipinin en yüksek incelik en düşük özgül ağırlığa sahip olması geçme yeteneği üzerinde bu faktörlerin etkili olabileceği sonucunu doğurmuştur.

10- En iyi geçme yeteneği Kompoze Çimento (KZÇ) + yuvarlak agrega (NA) ile sağlanmıştır.

11- KYB'nin taze haldeki üç temel özelliği (viskozite, akıcılık ve geçme yeteneği) üzerinde yuvarlak agrega (NA) en iyi performansı göstermiş iken ayrışma direncinde Beyaz Kalker (BK) daha iyi sonuç vermiştir. Buradan KYB üretiminde iri agreganın

kırmataş+yuvarlak agrega karışımından oluşturulması ile taze haldeki temel özelliklerde genel bir iyileşmenin sağlanmasının mümkün olabileceği sonucu çıkarılabilir. Örneğin, 4-8: yuvarlak agrega, 8-16: kırmataş.

12- Çimentolarda ise en yüksek ayrışma direnci Kompoze Çimento (KZÇ)'li betonlarda görülmüştür. Kalsiyum Alüminatlı Çimento (AÇ) ile üretilen betonlarda ise gözle görülebilen bir ayrışma gerçekleşmiştir. Ancak bu ayrışma elek ayrışması deneyinde net olarak belirlenememiştir. Bu nedenle bu çimentonun KYB'li betonlarda hangi şartlarda ve nasıl kullanılması gerektiği daha ayrıntılı olarak araştırılmalıdır.

13- KYB'lerin ayrışma direnci çimento tipi ve iri agrega çeşidine bağlı olarak değişmiştir. Kompoze Çimento (KZÇ)+ Beyaz Kalker (BK) karışımı en yüksek ayrışma direncini vermişken Portland Kompoze Çimento (PKÇ) + yüksek özgül ağırlığa sahip Bazalt (B1) karışımı en düşük ayrışma direncine sahip olmuştur.

14. KYB'lerin taze haldeki üç temel özelliği (viskozite, akıcılık ve geçme yeteneği) ile basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulamamıştır. Bu üç temel karakteristik üzerinde yuvarlak agrega kırmataşlardan daha iyi sonuçlar vermiş iken basınç dayanımında kırmataş agregalı karışımlar yuvarlak agregalılara göre daha yüksek değerlere sahip olmuştur. Buna karşın, ayrışma direnci en yüksek olan Beyaz Kalker (BK) ile üretilen betonların en yüksek basınç dayanımına sahip olması ayrışma direnci ile basınç dayanımı arasında bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Ayrışma direnci yüksek olan KYB'lerin dayanımlarının da yüksek olacağı söylenebilir.

15- En yüksek standart basınç dayanımı değerine sahip olmalarına rağmen Kalsiyum Alüminatlı Çimento (AÇ)'lar ile üretilen KYB'lerin dayanımları oldukça düşük çıkmıştır. Bunun nedeni ayrışmadır. Portland Çimentolu (PÇ) karışımlar ise, diğer çimento tiplerine göre daha yüksek standart basınç dayanımına sahip oldukları için, en yüksek ortalama dayanım değerlerine sahip olmuştur.

16- Hem %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içeren sülfatlı ortam hem de kirece doygun su içinde 24 hafta boyunca saklanan numunelerin ağırlıklarında artış olduğu belirlenmiştir. Ancak sülfatlı ortamdaki ağırlık değişimi kontrol numunelerinkinden daha fazla olmuştur. Bu sonuç sülfatlı ortamlarda saklanan KYB'lerin bu ortamdaki etkileşimlerini göstermektedir.

17- Çimento tipine göre yapılan hesaplamalarda sülfatlı ortamda en yüksek ağırlık artışı Kalsiyum Alüminatlı Çimento (AÇ) en düşük ise Portland Çimento (PÇ) içeren karışımlarda olduğu tespit edilmiştir. Kalsiyum Alüminatlı Çimento (AÇ)'li karışımların sülfattan en fazla etkilenmesinin nedeni bu çimento ile üretilen betonlarda görülen ayrışmaya bağlanmıştır. Ayrışma ile KYB bileşenlerinin homojen dağılmadığı bu nedenle de geçirimsizliği yüksek bir yapının oluştuğu düşünülmektedir.

18- İri agrega çeşidi açısından yapılan değerlendirmede ise en az ağırlık değişimi Beyaz Kalker (BK)'de en yüksek ise yuvarlak agregada (NA) görülmüştür.

19- KYB'nin viskozite, akıcılık ve geçme yeteneği için en iyi sonuçları veren yuvarlak agreganın sülfata maruz ortamlarda en iyi sonucu vermediği tespit edilmiştir. Buna karşın, ayrışma direncinde en iyi sonucu veren Beyaz Kalker (BK) sülfatlı ortamda da en iyi sonucu vermiştir. Buradan, temel karakteristiklerden olan ayrışma direncinin KYB'nin sülfat direnci özelinde durabilite özelliklerini etkileyeceği/belirleyebileceği sonucu çıkarılmıştır. Bununla birlikte, ayrışma direncinde ikinci en iyi sonucu veren yuvarlak agreganın sülfatlı ortamlarda en kötü sonucu vermesi bu konunun biraz daha ayrıntılı araştırılması gerektiği sonucuna götürmektedir.

20- Bu çalışmada çimento tipinin sülfat direnci üzerindeki etkisi ise beklenilen aksine çıkmıştır. Normal betonlar üzerinde yapılan çalışmalarda sülfata maruz betonlarda PÇ'nin en kötü sonucu verdiği belirtilmiş iken bu çalışmada en iyi sonucu vermiştir. Elde edilen veriler basınç dayanımı, ayrışma direnci gibi diğer bulgular ile birlikte değerlendirilince KYB'lerin sülfat direnci üzerinde çimentonun kimyasal içeriğinden ziyade betonların geçirimsizliklerinin belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, sülfat deneyi sonuçları; çimentoların ana bileşenlerinin oranları (özellikle C<sub>3</sub>A oranı),



$C_3S/C_2S$  oranı, oksit oranları (örneğin alümin modülü) ya da hidratasyon ürünlerinin çeşidi veya miktarı (özellikle  $Ca(OH)_2$ ) açısından analiz etmek mümkün olmamıştır. Çimentoların etkisinin belirlenmesi için deney süresinin uzatılması gerekir.

21- Bu çalışmada sodyum sülfat konsantrasyonu oranı yüksek alınarak (%10) 180 gün sonunda sülfat etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ancak yine de, yukarıdaki maddede belirtildiği gibi, sülfat hasarı net olarak belirlenememiştir. Bu nedenle KYB'lerin sülfat dirençlerini belirlemek için deney süresi çok daha uzun (3-4 yıl gibi) tutulmalıdır. Bu önerinin laboratuvar çalışmaları için oldukça uzun bulunması halinde ise alternatif deney yöntemleri üzerinde çalışılmalıdır. KYB'lerin geçirimsizliğinin normal betonlardan daha düşük olduğu da göz önünde bulundurulduğunda normal betonlar için geliştirilmiş olan deney yöntemlerinin KYB'ler için uygun olup olmadığı tartışılmalıdır.

22- Betonda sülfat hasarına sülfat etkisi ile oluşan yeni kristallerin neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, KYB'ler üzerinde yapılan çalışmalarda da SEM ve XRD gibi enstrümantal analiz yöntemleri kullanılarak etrenjit, tomasit, alçıtaşı gibi oluşumlardan hangisinin hasara neden olduğu belirlenmelidir.

## KAYNAKLAR

- Anonymous, 1977. ACI 201.2R-77: Guide to Durable Concrete. American Concrete Institute, ACI Committee 201.
- Anonymous, 1985. ACI 225R-85 Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements. American Concrete Institute, ACI Committee 225.
- Anonim, 1980a. TS 707: Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 1980b. TS 706: Beton Agregaları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 1982. TS 3440: Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar İçin Yapım Kuralları. TSE, Ankara
- Anonim, 1985. TS 802: Beton Karışımı Hesap Esasları. TSE, Ankara.
- Anonim, 1988. TS 6271: Alüminalı Çimentolar-Refrakter Olarak Kullanılan. TSE, Ankara.
- Anonymous, 1992. USBR 4908: Procedure for Length Change of Hardened Concrete Exposed to Alkali Sulfates. U.S. Department of The Interior, Bureau of Reclamation Standarts of Testing Procedures, Washington, US.
- Anonymous, 1995. ASTM C1012-95: Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. Philadelphia, PA, USA.
- Anonim, 1999. TS 3530 EN 933-1: Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu. TSE, Ankara.
- Anonim, 2000. TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. TSE, Ankara.
- Anonim, 2001. TS EN 1097-7: Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 7: Taşunu (Filler) Tane Yoğunluğunun Tayini- Piknometre Metodu. TSE, Ankara
- Anonim, 2002a. TS EN 206-1: Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. TSE, Ankara.
- Anonim, 2002b. TS EN 197-1:Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim 2002c. TS EN 1097-6: Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, TSE, Ankara.
- Anonim 2002d. TS EN 12350-1: Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 1: Numune Alma. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2005. TS EN 1992-1-1 Eurocode 2: Beton Yapıların Projelendirilmesi- Bölüm 1-1: Genel Kurallar ve Bina Kuralları. TSE, Ankara.
- Anonymous, 2005. ACI 318-05: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, US.
- Anonim, 2006. Betonda mucizevî çözümler: Kendiliğinden Yerleşen Betonlar. Hazır Beton Dergisi, sayı:74, 20-36.

- Anonim, 2007. Kendiliğinden Yerleşen Beton Kılavuzu. Türkiye Hazır Beton Birliği yayını, 63, Türkiye.
- Anonymous, 2007. ASTM C150-07 Standard Specification for Portland Cement, Philadelphia, PA, USA.
- Anonim, 2008. TS 10157: Çimento - Sülfata dayanıklı çimento - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. TSE, Ankara.
- Anonim, 2009. DEF Hasarı Riski nedir? İksa beton ve yapı kimyasalları (<http://www.iksa.com.tr>, Şubat 2009).
- Akman, M.S., 1992. Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi. İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
- Akman, M.S., 2003. Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (DEF). 5. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Müh. Odası, İstanbul.
- Al-Amoudi, O. S. B., 1997. Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Plain And Blended Cements Exposed to Sulfate Environments. Building and Environment, Vol. 33, pp. 53- 61.
- Atahan, H.N., Pekmezci B.Y., Uyan M. ve Yıldırım H., 2003. Sülfatların portland Çimentolu ve Sülfata Dayanıklı Çimentolu Betonların Dürabilitesine Etkisi. 5. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Müh. Odası, İstanbul.
- Arslan, M., 2001. Beton (Döküm, Kalıpları, Kusurları, Dayanıklılığı). Atlas Yayın Dağıtım, 237, İstanbul.
- Brown, P. W., 1981. An Evaluation of The Sulfate Resistance of Cements in a Controlled Environment. Cement and Concrete Research, Vol. 11, pp. 719- 727.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2002. Betonarme Yapılarda Kalıcılık. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 282, İzmir.
- Bekmezci, M., 2005. PÇ-42.5, PKÇ/B-42.5R, SDC-42.5 Çimentolu Betonların Sülfat Dayanıklılığının Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Bertill, P., 2003. Sulphate resistance of self-compacting concrete, Cement&Concrete Research, 33, 1933-1938.
- Crammond, N., 2002. The occurrence of thaumasite in modern construction. Cement&Concrete Composites, Vol. 24, 393-402.
- Cohen, M. D., Bentur, A. , 1988. Durability of Portland Cement Silica Fume Pastes, in Magnesium Sulfate and Sodium Solutions, ACI Journal, 5, 148-157.
- Dilek, F.T. ve Tokyay M., 2007. Mineral Katkılı Çimentolu Sistemlerin Sülfata Dayanıklılığı: Boy Değişim Değerleri. Çimento ve Beton Dünyası, 66, s:68-78.
- Duyar, O., 2006. Avrupa KYB şartnamesi ışığında tanımlar, dizayn yöntemi, deney metotları ve müh. özellikleri, Hazır Beton Dergisi, sayı:75, 46-52.
- Erdoğan, T., 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 741, Ankara.
- Felekoğlu, B., 2004. Kendiliğinden Yerleşen Beton Potansiyel Avantaj ve Dezavantajları, İMO İzmir Şubesi Haber Bülteni, sayı:120, 32-36.
- Felekoğlu, B., 2005. Kendiliğinden Yerleşen Beton üretiminde kullanılan kum özelliklerinin akışkanlaştırıcı kimyasal katkı performansına etkileri, Hazır Beton Dergisi, sayı:67, 30-36.
- Felekoğlu, B., Türkel, S., Baradan, B., 2004. Kendiliğinden Yerleşen Beton Toz Madde Kullanımının Taze ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Hazır Beton Dergisi, sayı:62, 68-77.

- Felekoğlu, B., Baradan, B., 2004. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özellikleri. THBB Beton 2004 Kongresi, İstanbul.
- Haktanır, T., Arı, K., Erdinç, M., Kurt, F., 2006. PÇ-42.5, PKÇ/B-42.5R, SDCÇ-32.5 Çimentolu Betonların Sülfürik Asit Eriyiğinden Oluşturulan Yüksek Konsantrasyonlu Sülfata Dayanıklılığının Deneysel İncelenmesi, DSİ Teknik Bülteni, 103, s:1-14.
- Higgins, D. D., Crammond, N. J., 2003. Resistance of concrete containing ggbs to the thaumasite form of sulfate attack, *Cement&Concrete Composites*, 25, 921-929.
- Gjory, O. E., 1971. Long- Time Durability of Concrete in Seawater, *Journal of The American Concrete Institute*, 68, 60- 67.
- Glasser, F.P., Marchand, J., and Samson, E., 2008. Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. *Cement and Concrete Research*, 38, pp 226–246
- Gurjar, 2004. Mix Design and Testing of Self-Consolidating Concrete. Using Florida Materials (Report No: BD 503), Florida, US.
- Irassar, E. F., Gonzalez, M., Rahhal, V., 2000. Sulphate resistance of type V cements with limestone filler and natural pozzolana. *Cement&Concrete Composites*, 22, 361-368.
- Kasap Ö., Şahmaran M., Duru K. ve Yaman İ.Ö., 2007. Katkılı Çimentolu Hamur, Harç ve Betonların Sülfat Direnci. *Çimento ve Beton Dünyası*, 69, s:52-63.
- Khatri, R. P., Sirivivatnanon, V., Yang, J. L., 1997. Role of Permeability in Sulfate Attack, *Cement and Concrete Research*, 27, 1179- 1189.
- Kılınç K. ve Uyan, M., 2003 Beton karışım suyundaki sülfat tuzlarının çimento harcı özelliklerine etkisi. 5. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Müh. Odası, İstanbul.
- Neville, A.M., 1986. *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited, 864, England.
- Neville, A., 2004. The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 1275–1296
- Özkul, M., 2002. Beton Teknolojisinde Bir Devrim: Kendiliğinden Yerleşen Sıkışan Beton, *Hazır Beton Dergisi*, Sayı:58, 64-71.
- Özkul, M. H., Işık, İ., Parlak, N., 2005. KYB: Temel ilkeler ve özellikleri, *Hazır Beton Dergisi*, sayı:68, 54-61.
- Özkan, S. B., 1992. Türkiye Doğal Puzolanları ile Üretilen Çimentoların Sülfata ve Nitrata Dayanıklılığı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Persson, B., 2003. Sulphate resistance of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 1933-1938
- Sağlam, A. R., 2001. Süperakışkanlaştırıcı ve viskozite artırıcı katkıların KYB özelliklerine etkisi. *Teknik Bülten*,1, 110-117
- Sağlam, A., Parlak, N., Doğan, Ü., Özkul, H., 2004. Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Katkı-Çimento Uyumu. *Beton 2004 Kongre Bildirisi*, İstanbul.
- Sağlam, A., Özkul, H., 2006. KYB'ların reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisi, *İTÜ Dergisi*, 5 (1b), 239-250.

- Şahmaran, M., Kasap, Ö., Duru, K., Yaman, İ.Ö., 2006. Çimento kompozisyonu ve su-çimento oranının harçların sülfat direncine etkileri. Çimento ve Beton Dünyası, 59, s:66-77.
- Santhanam, M., Cohen, M. D., Olek, J., 2001. Sulfate attack research-whither now? Cement and Concrete Research, 32, 845–851.
- Su, N., Hsu, K.C., and Chai, H.W., 2001. A simple mix design method for self-compacting concrete. Cement and Concrete Research, 31, 1799-1807.
- Sonebi, M., Grünwald, S., and Walraven J., 2007. Filling ability and passing ability of self-consolidating concrete. ACI materials journal, 104, pp. 162-170
- Stephens JB, Carrasquillo RL., 2000. Evaluating performance-based test and specifications for sulfate resistance in concrete. Research Report 1706-3. The University of Texas, US.
- Taşdemir, M.A. ve Akyüz, S., 1999. Betonun durabilitesi üzerine genel bir değerlendirme. Hazır Beton, 32, 37-43.
- Türk, K., Çalışkan, S., Yazıcıoğlu, S., 2006. Uçucu Küllü Kendiliğinden Sıkışan Betonun Mühendislik Özelliklerinin Farklı Kür Altında İncelenmesi. Teknik Bülten, 1, 17-22.
- Türkmen,İ., Kantarcı,A., 2005. KYB'ların Geçirimsizlik Katsayısı ve Mekanik Özellikleri Üzerine Farklı Kür Şartlarının ve Genleştirilmiş Perlit Agregasının Etkileri. II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, İstanbul.
- Tsivilis, S., Sorriadis, K., Skaropoulou, A., 2007. Thaumasite form of sulfate attack (TSA) in limestone cement pastes. Journal of the European Ceramic Society, 27, 1711-1714.
- Torres, S. M., Sharp, J. H., Swamy, R. N., 2003. Long term durability of portland-limestone cement mortars exposed to magnesium sulfate attack. Cement&Concrete Composites, 25, 947-954.
- Tosun, K., Yazıcı H., Yiğiter, H., Baradan, B., 2003. Uçucu Kül İçeren Çimento Harçlarının Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi, V. Ulusal Beton Kongresi. İstanbul.
- Uğurlu, A., 1996. Zararlı Kimyasal Etkilere Dayanıklı Beton Yapım Kuralları, DSİ Teknik Bülteni, 86, 13–32.
- Yalçın, H., 1975. Betonlarda sülfat korozyonu ve önleyici tedbirler, DSİ Teknik Bülteni, 35, 22-28.
- Yazıcı H., 2006. Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harçların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 8 Sayı: 1 S. 51-58.
- Zivica, V., Bajza, A., 2001. Acidic attack of cement based materials- a review. Part I, Principle of acidic attack. Construction and Building Materials, 15, 331–340.

**EK**

Sülfat etkisindeki (S) ve kontrol numunelerin (K) ağırlık değişimleri

KODU		BAŞLANGIÇ	2.HAFTA	4.HAFTA	6.HAFTA	8.HAFTA	10.HAFTA	12.HAFTA	14.HAFTA	16.HAFTA	18.HAFTA	20.HAFTA	22.HAFTA	24.HAFTA
ABK	S	3332,50	3342,80	3361,30	3364,50	3365,90	3367,20	3368,50	3369,50	3371,00	3371,15	3371,65	3372,75	3373,30
	K	3263,50	3266,90	3271,80	3276,20	3279,80	3281,75	3285,45	3288,15	3289,05	3291,00	3291,75	3292,45	3293,05
AB2	S	3128,50	3143,90	3156,80	3160,50	3161,75	3163,10	3164,05	3164,95	3166,00	3166,90	3167,50	3168,10	3168,80
	K	3243,00	3249,20	3252,75	3259,00	3262,75	3265,80	3269,00	3270,70	3274,35	3274,45	3275,45	3276,00	3276,90
AB1	S	3204,00	3218,65	3234,60	3237,65	3239,30	3240,35	3242,20	3243,15	3244,05	3243,75	3243,80	3243,80	3243,85
	K	3225,00	3229,65	3234,25	3238,80	3242,05	3244,80	3247,30	3248,60	3251,40	3252,50	3253,40	3253,80	3254,40
AGK	S	3318,05	3335,25	3349,80	3352,20	3353,25	3354,35	3355,15	3356,45	3357,25	3356,45	3357,55	3358,65	3359,05
	K	3279,00	3285,00	3288,10	3291,90	3295,65	3299,85	3302,25	3304,80	3307,00	3309,00	3309,40	3309,90	3310,30
ANA	S	3177,50	3197,30	3217,10	3219,35	3221,05	3222,50	3224,40	3225,75	3226,60	3227,95	3228,20	3228,50	3228,95
	K	3272,00	3277,35	3284,20	3288,90	3290,95	3295,50	3298,75	3301,75	3304,90	3306,00	3306,10	3306,20	3306,30
PKÇBK	S	3253,00	3261,15	3269,50	3268,50	3269,35	3270,40	3271,35	3272,10	3272,90	3273,95	3274,30	3274,80	3275,20
	K	3364,50	3368,50	3372,50	3375,20	3376,80	3377,95	3379,75	3381,70	3382,75	3383,50	3384,60	3385,50	3387,25
PKÇGK	S	3211,50	3225,85	3242,80	3243,10	3244,85	3245,60	3247,40	3247,85	3249,15	3248,75	3249,50	3250,10	3250,80
	K	3249,00	3253,80	3257,40	3261,65	3263,50	3266,35	3268,55	3270,70	3272,40	3273,60	3274,70	3275,60	3276,65
PKÇNA	S	3315,70	3331,30	3346,50	3349,20	3350,55	3351,45	3352,55	3353,45	3354,90	3354,95	3355,20	3355,80	3356,55
	K	3230,00	3236,65	3240,40	3242,75	3246,70	3250,30	3252,10	3254,75	3257,45	3257,50	3257,60	3257,70	3257,80
PKÇB1	S	3220,35	3230,65	3243,55	3246,10	3246,95	3247,85	3248,70	3250,00	3250,70	3251,55	3251,85	3252,05	3252,35
	K	3196,75	3199,40	3202,80	3206,20	3209,70	3211,85	3214,10	3215,70	3217,25	3217,50	3217,60	3217,70	3217,80
PKÇB2	S	3136,50	3149,80	3162,85	3162,95	3164,15	3165,40	3166,90	3168,25	3169,60	3169,65	3170,50	3171,00	3171,50
	K	3153,00	3158,20	3163,85	3167,15	3168,45	3173,30	3176,65	3179,20	3181,85	3182,40	3182,40	3182,45	3182,45
PÇNA	S	3242,15	3250,75	3260,60	3263,30	3263,95	3264,55	3265,20	3266,15	3266,70	3268,30	3270,00	3271,00	3272,05
	K	3253,20	3257,55	3261,35	3263,75	3266,40	3269,65	3270,90	3272,30	3274,50	3274,60	3274,70	3274,80	3274,95
PÇBK	S	3342,75	3349,20	3353,70	3353,80	3354,50	3355,15	3355,75	3356,15	3356,90	3357,80	3358,40	3359,50	3360,25
	K	3307,65	3310,70	3312,70	3314,70	3316,05	3317,60	3318,25	3319,50	3320,75	3320,85	3321,05	3321,15	3321,25

(Devam)

PÇB1	S	3257,90	3263,80	3271,20	3272,15	3273,30	3274,15	3274,95	3275,90	3276,80	3278,10	3278,80	3279,50	3280,50
	K	3278,60	3282,10	3284,60	3287,85	3289,15	3290,60	3291,75	3293,30	3293,75	3294,30	3294,00	3294,10	3294,25
PÇB2	S	3275,90	3285,80	3292,80	3294,05	3294,65	3295,45	3296,00	3296,60	3297,35	3299,05	3300,70	3301,80	3302,95
	K	3246,25	3250,20	3252,70	3254,70	3257,65	3259,50	3261,55	3262,50	3264,10	3264,15	3264,20	3264,25	3264,35
PÇGK	S	3265,00	3273,40	3282,25	3283,70	3284,35	3285,40	3285,75	3286,50	3287,25	3289,20	3290,80	3292,25	3293,35
	K	3280,10	3284,35	3288,05	3290,85	3293,50	3296,05	3297,35	3298,25	3299,55	3301,00	3302,40	3303,50	3304,60
KZÇGK	S	3176,10	3183,85	3199,20	3201,50	3202,25	3203,00	3203,70	3204,50	3205,25	3205,90	3206,80	3207,60	3208,20
	K	3228,05	3231,15	3234,05	3237,25	3240,40	3243,10	3244,45	3246,00	3247,85	3247,85	3247,85	3247,85	3247,85
KZÇNA	S	3212,55	3227,85	3240,50	3242,15	3243,00	3244,00	3245,00	3245,90	3246,80	3247,55	3248,40	3248,90	3249,80
	K	3208,65	3211,35	3216,05	3218,90	3222,45	3226,55	3230,50	3233,00	3236,65	3239,50	3239,80	3240,20	3240,65
KZÇB2	S	3131,30	3145,65	3156,20	3155,15	3156,95	3157,55	3159,80	3161,25	3163,30	3163,70	3164,60	3165,80	3166,70
	K	3114,15	3119,25	3123,45	3126,80	3130,20	3132,85	3135,40	3137,15	3138,85	3140,30	3140,80	3141,50	3141,90
KZÇB1	S	3128,15	3134,90	3139,25	3159,10	3160,00	3161,00	3162,35	3163,15	3164,00	3165,30	3165,70	3166,00	3166,35
	K	3130,45	3133,60	3137,50	3140,35	3145,24	3149,25	3152,70	3155,55	3158,05	3158,20	3158,35	3158,55	3158,75
KZÇBK	S	3273,00	3284,45	3289,45	3290,70	3291,60	3292,40	3293,60	3294,45	3295,45	3295,95	3296,15	3296,45	3296,85
	K	3275,70	3277,25	3279,60	3280,90	3282,55	3285,30	3287,35	3288,95	3291,25	3291,50	3291,65	3291,85	3292,05
SDÇB2	S	3257,25	3268,55	3278,20	3280,90	3281,30	3281,90	3282,25	3282,55	3282,90	3284,10	3284,80	3285,40	3286,00
	K	3231,80	3235,80	3238,30	3241,20	3243,50	3247,50	3249,95	3252,40	3254,45	3254,60	3254,80	3254,95	3255,10
SDÇBK	S	3317,50	3322,65	3329,50	3330,80	3331,30	3331,95	3332,55	3333,20	3334,05	3335,20	3335,90	3336,20	3336,90
	K	3317,00	3320,75	3323,45	3326,45	3327,55	3328,80	3330,05	3331,60	3332,85	3333,05	3333,40	3333,85	3334,40
SDÇNA	S	3330,15	3342,50	3352,20	3355,90	3356,80	3357,65	3358,15	3359,30	3359,85	3360,20	3362,50	3363,90	3365,15
	K	3441,40	3445,50	3449,05	3452,10	3455,40	3457,70	3460,40	3461,95	3464,40	3464,55	3464,65	3464,75	3464,85
SDÇB1	S	3421,15	3433,35	3444,75	3447,15	3447,80	3448,65	3449,70	3450,80	3452,05	3453,05	3454,10	3455,30	3456,25
	K	3266,55	3270,35	3273,00	3275,85	3280,00	3282,30	3285,10	3287,50	3290,05	3290,10	3290,20	3290,30	3290,45
SDÇGK	S	3391,70	3403,90	3416,30	3419,25	3420,05	3420,90	3421,50	3422,15	3423,05	3424,55	3425,70	3426,50	3427,00
	K	3317,60	3320,75	3323,00	3326,55	3330,40	3332,40	3335,25	3339,00	3342,10	3342,50	3342,85	3343,10	3343,55

## **ÖZGEÇMİŞ**

1981 yılında Erzurum'da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Erzurum'da tamamladı. 1999 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2003 yılında mezun oldu. 2004 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

Erzurum İl Sağlık Müdürlüğünde 2007 yılından beri İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaktadır.