



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MİKRONİZE KALSİT KATKISININ  
BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ŞÜKRÜ EMRE GÜLDÜR

Aralık 2013



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MİKRONİZE KALSİT KATKISININ  
BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ŞÜKRÜ EMRE GÜLDÜR

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

Aralık 2013

**Şükrü Emre GÜLDÜR** tarafından **Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU** danışmanlığında hazırlanan “**Mikronize Kalsit Katkısının Beton Özelliklerine Etkisinin Araştırılması**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Niğde Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Fatih ÖZCAN, Niğde Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Okan KARAHAN, Erciyes Üniversitesi

**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun ....../...../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

**Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA**

**MÜDÜR**

## ÖZET

### MİKRONİZE KALSİT KATKISININ BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

GÜLDÜR, Şükrü Emre  
Niğde Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

Aralık 2013, 77 sayfa

Bu çalışmada, Niğde bölgesinden temin edilen mikrokalsitin ve Yumurtaılık Sugözü Termik Santralinden elde edilen uçucu külün beton özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Karışımlarda, bağlayıcı miktarı ile s/b oranı sabit tutulmuştur. Mikronize kalsit ve uçucu kül hem ayrı ayrı, hem de birlikte çimento ile %10 ve %20 oranlarında ikame edilerek toplam 7 karışım hazırlanmıştır. Karışımlar üzerinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Mikrokalsitin, taze beton özellikleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Mikrokalsit katkılı betonların erken yaşlardaki basınç dayanımları, şahit ve uçucu kül katkılı betonlara oranla daha yüksek çıkmıştır. Ancak, ileri yaşlarda mikrokalsit katkılı betonların basınç dayanımı, aşınma ve geçirgenlik dirençlerinin daha düşük olduğu görülmüştür.

*Anahtar Sözcükler:* Mikronize kalsit, uçucu kül, basınç dayanımı, donma-çözülme, aşınma, klor iyon geçirgenliği, basınç altında su işleme derinliği

## SUMMARY

### THE INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MICRONIZED CALCITE ADDITION ON THE CONCRETE PROPERTIES

GÜLDÜR, Şükrü Emre

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

December 2013, 77 pages

In this study, the effect of microcalcite obtained from Nigde region and fly ash obtained from Yumurtalık Sugözü Thermal Power Plant on the concrete properties were investigated. The amount of binder and the w/b ratio were kept constant in the mixtures. Calcite and fly ash were substituted 10% and 20% of cement both separately and together and prepared 7 mixtures. The fresh and hardened concrete tests were carried out on the mixtures. No remarkable effect on the properties of fresh concrete was observed. The compressive strength in the early days of the mikrocalcite added concrete was higher than control concrete and fly ash added concrete. However, in the following periods the compressive strength, abrasion and permeability resistance of microcalcite concrete were lower.

*Keywords:* Mikrocalcite, fly ash, compressive strength, freeze-thaw, abrasion, chloride ion permeability, depth of penetration of water under pressure

## ÖN SÖZ

Bu çalışmada, Niğde Bölgesinde yoğun olarak bulunan kalsit madeninin beton içerisinde mineral katkı maddesi olarak ve puzolanik bir malzeme olan Uçucu kül ile birlikte kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla laboratuvar deneyleri yürütülmüştür. Farklı ikame miktarlarında mikrokalsitli, uçucu küllü ve hem mikrokalsitli hem de uçucu küllü karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlar kullanılarak, taze beton ve sertleşmiş beton üzerinde deneyler yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, Mikrokalsitin beton içerisinde mineral katkı olarak kullanılabilirliği yorumlanmaya çalışılmıştır.

Hem lisans hem de yüksek lisans eğitimim süresince, çalışmalarına güncel bilgisi, tecrübesi ve desteğiyle yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU'na en içten teşekkürlerimi bir borç bilir şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca tecrübelerine başvurduğum Doç. Dr. Fatih ÖZCAN, Doç. Dr. Mustafa SARIDEMİR, Doç. Dr. Metin H. SEVERCAN, Yrd. Doç. Dr. Semiha AKÇAÖZOĞLU ve İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine teşekkür etmek isterim.

Bu çalışma kapsamında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta Tema Beton Yapı Elemanları kurucuları, Sayın Oktay BEYAZIT, Ömer HAVUÇCU, İlhan ÖZDEMİR olmak üzere Bekir İ. MADSAR, Demir AKALIN, Murat KIZIL ve tüm Tema Beton Yapı Elemanları çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sadece bu tez çalışmasında değil tüm eğitim ve öğretim hayatım boyunca ilgi ve alakalarını eksik etmeyen, maddi ve manevi her zaman yanımda olan hayattaki en büyük değerlerim babam Yusuf GÜLDÜR ve annem Emine GÜLDÜR' e teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET .....	iii
SUMMARY .....	iv
ÖN SÖZ .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
FOTOĞRAF DİZİNİ .....	xii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
BÖLÜM I GİRİŞ .....	1
BÖLÜM II ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	3
2.1 Beton .....	3
2.1.1 Betonun avantajları ve dezavantajları .....	4
2.1.1.1 Betonun avantajları .....	4
2.1.1.2 Betonun dezavantajları .....	4
2.1.2 Betonu oluşturan malzemeler .....	5
2.1.2.1 Çimento .....	5
2.1.2.1.1 Çimentonun üretimi .....	5
2.1.2.2 Agregası .....	6
2.1.2.3 Karışım ve bakım suyu .....	6
2.1.2.4 Beton katkı maddeleri .....	7
2.1.3 Beton dayanımına etki eden faktörler .....	7
2.1.3.1 Deney yöntemi ile ilgili faktörler .....	7
2.1.3.2 Çimento ile ilgili faktörler .....	8
2.1.3.3 Agregası ile ilgili faktörler .....	8
2.1.3.4 Karışım suyu ile ilgili faktörler .....	9
2.1.3.5 İşlenebilirlik ile ilgili faktörler .....	9
2.1.3.6 Kür ile ilgili faktörler .....	9
2.1.3.7 Ayrışma ve kanama ile ilgili faktörler .....	9
2.2 Mineral Katkılar .....	10

2.2.1 Mineral katkıların çimento ve beton içerisinde kullanılması .....	12
2.2.1.1 Doğal mineral katkılar .....	12
2.2.1.2 Yapay mineral katkılar .....	12
2.3 Uçucu Kül .....	14
2.3.1 Uçucu külün üretimi .....	16
2.3.2 Uçucu kül sınıfları .....	17
2.3.2.1 Siliko-alüminalı uçucu küller .....	18
2.3.2.2 Siliko-kalsik uçucu küller .....	18
2.3.2.3 Sülfö-kalsik uçucu küller .....	18
2.3.3 Uçucu külün özellikleri .....	18
2.3.3.1 Uçucu külün fiziksel özellikleri .....	19
2.3.3.2 Uçucu külün kimyasal özellikleri .....	19
2.3.4 Uçucu küllerin kullanım alanları .....	20
2.3.4.1 Çimento ve beton üretiminde kullanımı .....	21
2.3.4.2 Tuğla üretiminde kullanımı .....	21
2.3.4.3 Hafif agrega üretiminde kullanımı .....	21
2.3.4.4 Yol yapımında ve geoteknik uygulamalarda kullanımı .....	22
2.3.4.5 Seramik ve cam üretiminde kullanımı .....	22
2.3.5 Uçucu Külün Beton Özelliklerine Etkileri .....	23
2.3.6 Uçucu Kül İkame Metotları .....	23
2.3.6.1 Basit ikame metodu .....	24
2.3.6.2 Değiştirilmiş ikame metodu .....	24
2.3.6.3 Rasyonel oranlama metodu .....	24
2.3.7 Taze beton özellikleri üzerine etkileri .....	25
2.3.7.1 İşlenebilirlik .....	25
2.3.7.2 Priz süresi .....	26
2.3.7.3 Hidratasyon ısısı .....	26
2.3.7.4 Kanama (Terleme) .....	27
2.3.8 Sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkileri .....	27
2.3.8.1 Basınç ve çekme dayanımı .....	27
2.3.8.2 Rötne .....	28

2.3.8.3 Elastisite modülü .....	29
2.3.9 Betonun dayanıklılık özelliklerine etkileri .....	29
2.3.9.1 Su geçirimsizlik .....	30
2.3.9.2 Sülfatlara dayanıklılık .....	30
2.3.9.3 Alkali-agrega reaksiyonu .....	31
2.3.9.4 Karbonatlaşma .....	32
2.3.9.5 Aşınma direnci .....	32
2.3.9.6 Donma-çözülme .....	32
2.4 Kalsit .....	33
2.4.1 Dünya ve Türkiye’de kalsit .....	33
2.4.2 Kalsitin kullanım alanları .....	34
2.4.2.1 Kağıt sektörü .....	34
2.4.2.2 Boya sektörü .....	34
2.4.2.3 Plastik sektörü .....	35
2.4.2.4 İnşaat sektörü .....	35
<b>BÖLÜM III MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>36</b>
3.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri .....	36
3.1.1 Çimento .....	36
3.1.2 Uçucu kül .....	37
3.1.3 Mikronize kalsit .....	37
3.1.4 Agrega .....	38
3.1.5 Kimyasal katkı malzemesi .....	40
3.1.6 Karışım ve bakım suyu .....	40
3.2 Beton Karışım Oranları .....	41
3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	42
3.4 Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneysel Çalışmalar .....	43
3.4.1 Çökme (Slamp) deneyi .....	43
3.4.2 Yayılma tablası deneyi .....	44
3.4.3 Hava muhtevasının tayini deneyi .....	45
3.4.4 Basınç dayanımı .....	45
3.4.5 Ultrases geçiş hızının belirlenmesi .....	46

3.4.6 Çabuk donma ve çözülme koşulları altında betonda dayanıklılık tayini deneyi .....	47
3.4.7 Aşınma dayanımının tayini deneyi .....	48
3.4.8 Basınç altında su işleme derinliğinin tayini deneyi .....	49
3.4.9 Beton için hızlandırılmış klor iyon geçirgenliği tayini deneyi .....	50
<b>BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>52</b>
4.1 Çökme (Slamp) Deneyi .....	52
4.2 Yayılma Tablası Deneyi .....	52
4.3 Hava Muhtevasının Tayini Deneyi .....	53
4.4 Basınç Dayanımı Değerleri .....	53
4.5 Ultrases Geçiş Hızları .....	56
4.6 Betonun Donma Çözülme Dayanımı .....	57
4.7 Aşınma Mukavemeti .....	59
4.8 Basınç Altında Su İşleme Derinliği .....	60
4.9 Klor İyon Geçirgenliği .....	62
<b>BÖLÜM V SONUÇLAR .....</b>	<b>65</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>67</b>
<b>ÖZ GEÇMİŞ .....</b>	<b>77</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. ASTM C 618 (1994)'e göre uçucu kül sınıfları .....	17
Çizelge 2.2. Çeşitli uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları .....	20
Çizelge 3.1. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri .....	36
Çizelge 3.2. Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri .....	36
Çizelge 3.3. Uçucu külün kimyasal özellikleri .....	37
Çizelge 3.4. Deneysel çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri .....	38
Çizelge 3.5. Kullanılan agrega granülometrisi .....	39
Çizelge 3.6. Kullanılan karma ve kür suyunun analiz sonuçları .....	41
Çizelge 3.7. Bir metreküp betonu oluşturan malzeme miktarları .....	41
Çizelge 3.8. ASTM C 1202'e göre geçirgenlik sınıfları .....	50
Çizelge 4.1. Karışımlara ait çökme değerleri .....	52
Çizelge 4.2. Karışımlara ait yayılma tablası deney sonuçları .....	52
Çizelge 4.3. Karışımlara ait hava muhtevası değerleri .....	53
Çizelge 4.4. Karışımlara ait betonların basınç dayanımları .....	54
Çizelge 4.5. Karışımlara ait ultrases geçiş hızları değerleri .....	56
Çizelge 4.6. Ultrases geçiş hızlarının pratik değerlendirilmesi .....	56
Çizelge 4.7. Karışımlara ait basınç mukavemeti kaybı .....	58
Çizelge 4.8. Beton numunelerin hızlı klor-iyon geçişi değerleri .....	64

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Uçucu külün granülometri eğrisi .....	37
Şekil 3.2. Mikronize kalsitin granülometri eğrisi .....	38
Şekil 3.3. Kullanılan agreganın granülometri eğrisi .....	39
Şekil 3.4. Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi .....	47
Şekil 4.1. Toplam %10 ikameli karışımlara ait betonların basınç dayanımı .....	55
Şekil 4.2. Toplam %20 ikameli karışımlara ait betonların basınç dayanımı .....	55
Şekil 4.3. Basınç dayanımı ultrases geçiş hızı ilişkisi .....	57
Şekil 4.4. Karışımlara ait betonların donma çözülme değerleri .....	58
Şekil 4.5. Karışımlara ait aşınma miktarları .....	59
Şekil 4.6. 28 Günlük numunelerin basınç-aşınma dayanımı ilişkisi .....	60
Şekil 4.7. 90 Günlük numunelerin basınç-aşınma dayanımı ilişkisi .....	60
Şekil 4.8. Basınç altında su işleme derinliği değerleri .....	61
Şekil 4.9. Karışımlara ait klor-iyon değerleri .....	63

## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1.	Uçucu külün iç yapısı .....	16
Fotoğraf 3.1.	Taze betonun hazırlanması .....	42
Fotoğraf 3.2.	Taze betonların kalıplara yerleştirilmiş hali .....	43
Fotoğraf 3.3.	Çökme deneyi .....	44
Fotoğraf 3.4.	Yayıma tablası deneyi .....	44
Fotoğraf 3.5.	Betonda hava muhtevası ölçmesi için kullanılan deney aleti .....	45
Fotoğraf 3.6.	Basınç dayanım test cihazı .....	46
Fotoğraf 3.7.	Numunelerin ultrases geçiş hızının belirlenmesi .....	47
Fotoğraf 3.8.	Donma çözülmeye maruz kalmış beton numuneler .....	48
Fotoğraf 3.9.	Betonda aşınma deneyi .....	49
Fotoğraf 3.10.	Betonda basınç altında su işleme derinliği .....	50
Fotoğraf 3.11.	Hızlandırılmış klor iyon geçirgenliği deney aleti .....	51

## SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

### Açıklama

$\mu$	Mikron
A	Kesit alanı
$\sigma$	Gerilme

### Kısaltmalar

### Açıklama

ASTM	Amerikan Deney ve Malzeme Birliği
MPa	Mega Pascal
PÇ	Portland Çimento
ODTÜ	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü

## BÖLÜM I

### GİRİŞ

Günümüzde yaygınlaşan yüksek performanslı beton üretiminde puzolanik malzeme kullanımı oldukça artmıştır. Beton üretiminde kullanılan puzolanların çoğu endüstriyel atık malzemeler veya yan ürünlerdir. Puzolanik katkı maddeleri, kullanılan malzemenin tipine ve oranına bağlı olarak, beton karışımının su ihtiyacı, taze betonun kıvamı, işlenebilme, segregasyon, priz süresi, terleme, beton basınç dayanımı, dayanıklılık, ekonomiklik gibi taze ve sertleşmiş betonun birçok özelliğini etkileyebilmektedir (Erdoğan, 2003).

Puzolanik malzemeler,  $\text{Ca(OH)}_2$  (kalsiyum hidroksit) ile sulu ortamda birleştiği takdirde, hidrolik bağlayıcılık göstermektedir. Puzolanlar ince tanelerden oluşması nedeniyle, taze beton kıvamını ve işlenebilirliğini azaltmakta, su ihtiyacını artırmaktadır. Bu nedenle, yüksek dayanımlı beton üretimi için mineral katkı malzemesi kullanıldığında, ayrıca su azaltıcı katkı maddesinin de kullanılması gerekmektedir (Kaymak, 2010).

Uçucu kül, silisli ve alüminli amorf yapıya sahip ve çok ince taneli olarak elde edilen ve puzolanik özellik gösteren mineral katkılardan birisi olarak yaklaşık 50 yıldır dünyada kullanılmaktadır (Sahmaran ve Li, 2009). Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %10-50'si civarında değişebilmektedir. Bazı araştırmacılara göre 2010 yılında çevreye bırakılan uçucu kül miktarının 800 milyon ton değerine ulaştığı bilindiğinden bu malzemenin beton üretiminde değerlendirilmesi önem arz etmektedir (Uysal, 2010). Çevreye verebilecekleri zararlardan dolayı Türkiye’de ve dünyada potansiyel yan ürün olarak çıkan uçucu küllerin ekonomiye kazandırılması zorunluluk arz etmektedir.

Uçucu külün betona ilave edilmesi birçok yararları da beraberinde getirmektedir. Uçucu küller, hidrasyon ürünlerini arttırarak betonun porozitesini azaltmakta, mikro agrega etkisi yaparak tane dağılımını düzenlemekte ve optimum sıkışmayı sağlamaktadır.

Böylelikle betonun dış etkilere karşı dayanıklılığı artmaktadır. Ayrıca, küresel ve düzgün yüzeyli yapısı nedeniyle taze betonun işlenebilirliğini de artırmaktadır (Ünal, 2004).

Kalsit, kimyasal yapısı %95-97 oranında  $\text{CaCO}_3$  (kalsiyum karbonat) içeren bir mineraldir ve karbonatlı kayaçların (kireç taşları, mermer, tebeşir) ana mineralidir. Türkiye'deki rezervlerde,  $\text{CaCO}_3$  oranı yüksek, silis ve demir safsızlıkları çok düşük orandadır. Mikrokalitin beton karışımında kullanılması durumunda homojen olarak dağılması sağlanmalıdır. Kireçtaşı tozu elektrostatik olarak negatif, kum ve iri agrega pozitif yüklü olduğundan agrega yüzeyine yapışır. Bu yapışmayı engellemek için, malzemelerin karıştırma sırasına ve yöntemine özen göstermek gerekir. Mikroyapı incelemesi ile yapılan çalışmalarda, önce çimento ve taş tozunun karıştırılıp, sonra agreganın ilave edildiği durumda en iyi performans elde edilmiştir. Kalsitin betonun dayanım kazanma hızına etkisi C-S-H oluşumuna uygun çekirdek oluşturarak hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırması ve  $\text{C}_3\text{A}$ 'sı yüksek çimentolarla reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan karboalüminat oluşturması ile açıklanmaktadır (Matschei vd., 2007).

Bu çalışmada, Niğde Bölgesinde yoğun olarak bulunan kalsit madeninin beton içerisinde mineral katkı maddesi olarak ve puzolanik bir malzeme olan Uçucu kül ile birlikte kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla laboratuvar deneyleri yürütülmüştür. Farklı ikame miktarlarında Mikrokalitli, Uçucu küllü ve hem Mikrokalitli hem de Uçucu küllü karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlar kullanılarak, taze beton üzerinde çökme deneyi, yayılma tablası deneyi ve hava muhtevası deneyi yapılmıştır. Sertleşmiş beton üzerinde ise, donma-çözülme dayanımı, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, aşınma dayanımı, basınç altında su işleme derinliği, hızlandırılmış klor iyon geçirgenliği deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, Mikrokalitin beton içerisinde mineral katkı olarak kullanılabilirliği yorumlanmaya çalışılmıştır.

## BÖLÜM II

### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

#### 2.1 Beton

Yapı malzemesi olarak beton, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin kullanılmasıyla üretilen kompozit bir malzemedir. Üretiminin kolaylığı, istenilen şeklin verilebilmesi, yüksek basınç dayanımı ve ekonomik olması nedeniyle beton; günümüzde vazgeçilmez bir yapı malzemesi konumundadır. Hem betonarme hem de çelik yapı sistemlerinde betonun kullanılmadığı alan neredeyse yoktur. Beton teknolojisi ise bu yoğun talep karşısında sürekli bir gelişim içerisinde.

Geçmişte 1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek beton basınç dayanımı 15–25 MPa arasında iken 1970'li yıllarda yüksek katlı yapılarda kolon yüklerinin temele taşınabilmesi için 40–50 MPa beton basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Zaman içerisinde dayanımları artan bu betonlara yüksek performanslı beton adı verilmiş ve yol, köprü, liman yapısı vb. uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır (Kaymak, 2010).

Betondaki dayanım artışına paralel olarak zaman içerisinde su/çimento oranında da düşüş gerçekleşmiştir. 1950'li yıllarda su/çimento oranı 0.60–0.70 aralığında değişirken 1970'li yıllarda akışkanlaştırıcıların devreye girmesi ile bu aralık 0.40-0.55'ye düşmüş, 1980 ve 1990'lı yıllarda ise süper akışkanlaştırıcılar sayesinde söz konusu su/çimento oranı 0.25-0.35 aralığına inmiştir. Tüm bunlarla birlikte 1980'li yıllardan sonra ultra ince mineral katkı olan silis dumanının beton içerisinde kullanımının yaygınlaşması ile dayanımlarda çok yüksek artışlar sağlanmıştır. Daha sonra su/çimento oranının 0.20'nin altına düşürülmesi ile yeni kuşak süper akışkanlaştırıcılar, kısa kesilmiş yüksek dayanımlı çelik teller ve sıcak su kürü ve basınçlı su buharı kullanarak beton basınç dayanımları 200 MPa'ın üzerine çıkarılmıştır (Özdemir, 2006).

## **2.1.1 Betonun avantajları ve dezavantajları**

### **2.1.1.1 Betonun avantajları**

1. Taze Betonun Plastik Özelliği Nedeniyle, istenilen şekil ve boyutlardaki beton elemanlar kolayca üretilebilmektedir.
2. Sertleşmiş beton elemanlar yapıdaki yerinde üretilebildiği gibi, bir fabrikada da önceden üretilebilmekte ve yapıya sertleşmiş beton elemanları olarak getirilip kullanılabilir.
3. Beton yerleştirme yöntemlerinde çeşitlilik ve kolaylık bulunmaktadır.
4. Sertleşmiş beton oldukça yüksek basınç dayanımına sahiptir.
5. Sertleşmiş beton, hizmet gördüğü süre boyunca, çevrede oluşan yıpratıcı etkenlere karşı diğer yapı malzemelerinin çoğundan daha dayanıklıdır. Bakım işlemleri ve masraf gerektirmemektedir.
6. Beton, çelik donatılarla çok iyi aderans (kenetlenme) gösterebilecek kapasitede bir özelliğe sahiptir.
7. Beton, diğer yapı malzemelerine göre, daha ekonomiktir.
8. Beton, estetik amaçlarla kullanılmaya uygun özellikte bir malzemedir.

### **2.1.1.2 Betonun dezavantajları**

1. Sertleşmiş beton, çekme dayanımı düşük olan bir malzemedir.
2. Sertleşmiş beton gevrek özelliğe sahiptir.
3. Beton, çevreden maruz kalabileceği ıslanma-kuruma veya sıcaklık değişiklikleri karşısında bir miktar hacim değişikliği gösterebilmektedir.
4. Beton, birçok yapı malzemesi gibi, sabit yükler altında zamanla kalıcı deformasyon gösterebilmektedir.
5. Beton, mükemmel bir geçirimsizliğe sahip değildir; içerisine bir miktar su veya zararlı maddeler içeren sular sızabilmekte ve betonun dayanıklılığını azaltabilecek olaylara neden olabilmektedir.
6. Betonlardaki “dayanım/ağırlık” oranı, metallerde olduğu kadar yüksek değildir.

## **2.1.2 Betonun oluşturan malzemeler**

### **2.1.2.1 imento**

Çimento, belli oranlarda karıştırılan kil, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CaCO<sub>3</sub> (kalker) karışımının çeşitli sıcaklık derecelerinde (1200-1400 °C) pişirilmesi sonucu elde edilen, havada ve suda katılaşma özelliği gösteren, gri ve beyaz renkli, inorganik esaslı bir bağlayıcı türüdür. Günümüzde en geniş çaplı kullanım alanına sahip olan imento; inşaat sektöründe en büyük payı ihtiva etmektedir. Ülkemizde ve uluslararası çapta bağlayıcılar arasında en fazla kullanım alanına sahip malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çimento, su ile karıştırıldığında hidratasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur (pasta) oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır (Grhan, 2006).

Katkılı imento üretiminde; klinker ve alçı taşı dışında, imento tipine göre tek veya birkaçı bir arada olmak üzere tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb. katılır. Çimento birçok beton karışımında hacimce en kk yeri işgal eden bileşendir; ancak beton bileşenleri içinde en önemlisidir (Günindi, 2005).

Beton içerisinde imento dozajı belirli sınırlar içerisinde arttıķa beton basınç mukavemeti de artmaktadır. Ancak bu artış belli bir noktaya kadar geçerlidir. Belirli bir noktadan sonra betonda imento miktarı arttırıldığında mukavemetteki artıma yavaşlar veya durur (Nebioğulları, 2010).

#### **2.1.2.1.1 imentonun üretimi**

Çimento, killi ve kalkerli hammaddelerin, yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle oluşan klinkerin, az miktarda (%3-%6 oranında) alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilen bağlayıcı özelliğe sahip malzemedir. Pişirme işlemi, döner fırın adı verilen, içi boş ve kendi eksenini etrafında dönebilen, yatay yerleştirilmiş silindir bir fırın ile yapılmaktadır. İçi ateş tuğlası ile kaplı bu elik fırın, bir ucu diğer ucundan biraz daha yüksekte kalacak şekilde, yaklaşık %3-%6 eğimde yerleştirilir. apı 2-6 m. arasında

değişen döner fırınların en/boy oranı 15-30 civarında olup, sıcaklık fırının alt ucundan püskürtülen yakıtla sağlanır. Bu yakıt fuel-oil olabildiği gibi, son yıllarda ekonomik nedenlerle kömürden de yararlanılmaktadır (Özcan, 2005).

Son ürünün piyasaya sürülmek için taşınması, hammaddenin taşınmasından daha ucuz olduğundan, üretimi çoğunlukla hammaddenin çıkartıldığı taş ocaklarının yanında gerçekleştirilir. Hammadde olarak kullanılan kireçtaşı ve tebeşir, bir kalsiyum karbonat kaynağı, kil ve taşlar da, alüminyum silikat kaynağıdır. Yakınında bir yerde varsa, demir filizi ve yüksek fırın cürufu da kullanılabilir (Nebioğulları, 2010).

### **2.1.2.2 Agregata**

Agregalar, beton yapımında çimento ve su ile birlikte kullanılan, kum, çakıl, kırmataş gibi taneli malzemelerdir. Beton hacminin yaklaşık %75'i agregata tarafından oluşturulmaktadır. Beton yapımında kullanılan en pahalı malzeme çimentodur. Agreganın maliyeti çimento maliyetine göre oldukça düşüktür. Bu nedenle, istenilen kalitedeki betonu elde edebilmek kaydıyla, betonda mümkün olabildiği kadar çok miktarda agregata kullanılması, betonun daha ekonomik olmasına yol açmaktadır (Erdoğan, 2003).

Beton agregalarının kalitesi, tanelerinin yüzey durumu, tanelerin biçimi granülometrisi ve fiziksel özellikleri ile ilgilidir Granülometri bileşimi, boyutları belirli limitler arasında bulunan tanelerin agregata içinde hangi miktarda bulunduğunu açıklamaktadır. Bu nedenle beton agregaları üzerinde granülometri deneyleri yapılması gerekir. Betonda inceden iriye doğru boyutta yavaş yavaş ve uygun bir değişim olması istenir. Bu da uygun bir gradasyon oranının seçilmesiyle elde edilebilir (Nebioğulları, 2010).

### **2.1.2.3 Karışım ve bakım suyu**

Beton yapımında kullanılan su değişik amaçlara yönelik olarak kullanılmaktadır. Bunları, çimento ve agregata ile birlikte beton karılmasında "karışım suyu" olarak, yerine yerleştirilen ve prizini alarak bir miktar mukavemet kazanan betonun yüzeyine uygulanan "kür suyu" olarak ve betonda kullanılacak agregaların temiz olmalarını sağlamak üzere "yıkama suyu" olarak üç başlık altında toplamak mümkündür.

Beton malzemelerin karılmasında kullanılan karışım suyunun iki önemli görevi bulunmaktadır: Birincisi, çimento ile birleşerek hidrasyonun yer almasını sağlamak, ikincisi ise agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak üretilen taze beton karışımında istenilen işlenebilmeyi sağlamaktır (Özdemir, 2006).

TS EN 1008'e göre, karma suyu içilebilir su olarak ifade edilmektedir. Karma suyu olarak kullanılacak diğer sular, kimyasal özellikler veya priz süresi ve basınç dayanımı için verilen özellikleri de sağlamalıdır. Karışım suyu, temiz olmalı, içerisinde taze ve sertleşmiş beton özelliklerine zararlı etkide bulunabilecek kadar kil, silt, asit, klorür, organik madde, sülfat, yağ ve endüstriyel atıklar gibi yabancı madde de bulunmamalıdır.

#### **2.1.2.4 Beton katkı maddeleri**

Katkılar, çimento, agrega ve suyun dışında, betonun taze veya sertleşmiş haldeki özelliklerini istenilen şekilde değiştirmek üzere, karıştırma işleminden hemen önce veya karıştırma işlemi sırasında betona katılan malzemelerin genel adıdır. Bu katkılar betonun akışkanlığını arttırması, erken ve yüksek mukavemete ulaşılması, geçirimsizliğin sağlanması gibi fonksiyonların dışında priz süresinin geciktirilmesi veya erken priz sağlaması gibi sıcak ve soğuk havalarda beton dökümüne imkan vermektedir. Tüm bu nedenlerle beton katkı maddelerinin günümüz inşaat sektöründe kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir.

#### **2.1.3 Beton dayanımına etki eden faktörler**

Beton dayanımını etkileyen faktörler çok çeşitlidir. Bu faktörler betonu oluşturan malzemelerden, deney yöntemi ve deney yürütme ortamından kaynaklanan etkiler olarak aşağıda verilmektedir.

##### **2.1.3.1 Deney yöntemi ile ilgili faktörler**

Numune boyutu ve geometrisi; genel olarak, numune boyutları küçüldükçe dayanım artar. Numune boyutu ile dayanım arasındaki ilişki Silindir numunelerde boy/çap (l/d) oranı arttıkça dayanım azalır. Ayrıca, bütün diğer koşullar sabit tutulduğunda, standart

silindir numuneden elde edilen dayanım standart küp numuneden elde edilen dayanımın yaklaşık %85'i kadardır (Özer, 2009). Yükleme hızı; yüklemeye hızı arttıkça dayanım artar. Numunenin rutubet durumu; kuru numuneler ıslak numunelere oranla daha yüksek dayanım gösterirler. Deney ortamının sıcaklığı; deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı yükseldikçe dayanım düşer.

### **2.1.3.2 Çimento ile ilgili faktörler**

Çimento cinsi ve özellikleri, beton mukavemetine etki eden en önemli özelliklerden biridir. Çimento özelliklerinin mukavemet üzerine etkisi, büyük ölçüde bunların hidrasyon olayının hızlı veya yavaş bir şekilde seyir etmeleri ile açıklanabilir. Hidrasyonun hızlı bir şekilde gelişmesi halinde çimento mukavemeti kısa zamanda büyük değerler alır. Beton içerisinde çimento dozajı belirli sınırlar içerisinde arttıkça beton basınç mukavemeti de artmaktadır. Ancak bu artış belli bir noktaya kadar geçerlidir. Belirli bir noktadan sonra betonda çimento miktarı arttırıldığında mukavemetteki artma yavaşlar veya durur.

### **2.1.3.3 Agregalar ile ilgili faktörler**

Beton mukavemetine etki eden diğer etken, bileşenlerden biri olan agreganın kendi kalitesidir. Beton agregalarının kalitesi, tanelerinin yüzey durumu, tanelerin biçimi granülometrisi ve fiziksel özellikleri ile ilgilidir. Betonda agregalar ile çimento hamuru arasında büyük bir bağ kuvvetinin bulunması yani kuvvetli bir aderansın olması betonun mekanik mukavemetinin yüksek bir değer almasına yardımcı eder.

Granülometri bileşimi, boyutları belirli limitler arasında bulunan tanelerin agregada içinde hangi miktarda bulunduğunu açıklamaktadır. Bu nedenle beton agregaları üzerinde granülometri deneyleri yapılması gerekir. Betonda inceden iriye doğru boyutta yavaş yavaş ve uygun bir değişim olması istenir. Bu da uygun bir gradasyon oranının seçilmesiyle elde edilebilir.

#### **2.1.3.4 Karışım suyu ile ilgili faktörler**

Su-çimento (S/Ç) oranının beton mukavemetine etki eden, en önemli faktörlerden biri olduğu araştırmalar sonucu kabul edilmiştir (Özer, 2009). Betonun vibrasyonla yeteri kadar yerleştiği kabul edilirse bu durumda sadece çimento hamurundaki kapiler boşluklar mevcut olacaktır. Çimento hamurundaki kapiler boşluk hacmi su-çimento oranı ile hidrasyon derecesine bağlı olarak değişmektedir. Betonda su miktarı dolayısıyla su çimento oranı ne kadar düşük olursa çimento taneleri arasındaki mesafe o kadar küçülecek ve hidrasyon sonunda gelişen kristaller bu boşlukları doldurarak geçirimsizliği düşürecektir.

#### **2.1.3.5 İşlenebilirlik ile ilgili faktörler**

Betonun taze haldeki işlenebilirliği katılaştıktan sonraki dayanımını etkileyen önemli faktörlerden birisidir. İşlenebilirlik betonun yerine yerleştirilmesi ve sıkıştırılması ile yakından ilgili olduğundan, işlenebilirliği az olan betonlar iyi sıkıştırılıp yoğun bir şekilde yerleştirilemeyecektir. Dolayısıyla beton içinde oluşacak boşluklar nedeniyle de dayanım azalmalarına sebep olacaktır.

#### **2.1.3.6 Kür ile ilgili faktörler**

Beton karışım suyu, hidrasyon süresince kayba uğrar. Eğer bu su kaybı önlenmez ise betonun mukavemet ve dayanıklılığı azalır. Ayrıca betonda ani kuruma sonucu büzülmelemlerden dolayı plastik çatlaklar oluşur. Özellikle hidrasyon ısısının önemli artış gösterdiği ilk günlerde beton çok naziktir ve özenle korunması gerekir. Betonun bu süre içerisinde kurumamalıdır. Bunun için, beton devamlı olarak nemli tutulmalıdır. Bu işlem ilk 3 gün için kesinlikle yapılmalı 7 ile 14 güne kadar uzatılması ise tavsiye edilmektedir.

#### **2.1.3.7 Ayırışma ve kanama ile ilgili faktörler**

İşlenebilirlik açısından bakıldığında, beton ayırışmamalı (segregasyon yapmamalı) ve yeterince yapışkanlık göstermelidir. Tam sıkıştırmaya erişmede segregasyonun rolü büyüktür. Segregasyonun yokluğunda ancak tam sıkıştırma sağlanabilir. Taze betondaki

segregasyon bileşenlerin homojen dağılmaması dolayısıyla mukavemetin (dayanımın) homojen olmaması demektir. Agregada boyut dağılımı (gradasyon) segregasyon açısından çok önemlidir. Gradasyon uygun seçilerek segregasyon minimize edilebilir. Kanama, beton yüzeyinde su toplanması olarak da bilinir. Segregasyonun bir formudur. Bunun sebebi ise taze betonun katı bileşenlerinin aşağı doğru çökerken suyu tutamamalarından kaynaklanır. Kanama sayısal olarak, birim yükseklikteki bir betonun yüksekliğindeki oturma nedeniyle olan azalma şeklinde ifade edilebilir. Çimento hamuru katılaşmaya başlayınca kanamada yok olur. Kanama nedeniyle, tabakalar halinde yerleştirilen betonun her bir tabakasının üstü aşırı derecede ıslak olur. Eğer bu sular iki tabaka arasında sıkışır kalırsa, zayıf, boşluklu ve durabilitesi düşük bir tabaka elde edilmiş olur. Terleme plastik rötreye sebep olabilir. Bazı hallerde karışım içinde yükselmeye çalışan su iri agregada taneleri altında takılıp kalabilir, dolayısıyla zayıf bir tutunma bölgesi (çimento-agrega arasında) oluşur. Betonun geçirgenliğini de artırır. Donma-çözünme tehlikesine karşı kanamadan kaçınılmalıdır. Kanama genellikle ince plaklarda (yol kaplaması, bina döşemesi gibi) daha çok görülür.

## **2.2 Mineral Katkılar**

Çimento gibi öğütülmüş toz halde silolarda depolanan cüruf, uçucu kül, silis dumanı, taşunu vb. çeşitli maddelere 'Mineral Katkı' adı verilir. Mineral katkıları tek başına iken çimento gibi bağlayıcılık özelliği taşımazlar. Ancak çimento ile birlikte kullanıldıklarında çimentoyla benzer görev yaparlar ve dolayısıyla çimento ekonomisi sağlarlar. Mineral katkılardan yüksek dayanımlı beton üretiminde de yararlanılır (Hamalı, 2007).

Puzolanlar doğal ya da yapay kökenli malzemelerdir. Bu malzemeler neredeyse hiç bağlayıcı özellik göstermez iken; ince ince ayrılmış formları nemli ortam varlığında ve normal sıcaklıkta, çimento esaslı bileşikler oluşturmak amacıyla kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona girebilir. Gerçekte puzolan ismi, şiddetli volkanik püskürmelerin zamanla camlaşması sonucu oluşan malzemelere verilen isimdir. Günümüzde ise, su varlığında kireç ile reaksiyona giren bütün malzemeleri tanımlamak için kullanılan bir jenerik ismi haline gelmiştir (Özer, 2009).

ASTM C125 (1994) ve ASTM C 618 (1994)'e göre puzolanlar, silisli ya da silisli ve alüminli malzemeler olup çok az ya da hiç bağlayıcı değeri olmayan, fakat ince öğütülmüş durumda ve nemin bulunduğu ortamda kalsiyum hidroksitle normal sıcaklıkta kimyasal olarak reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşen oluşturan malzemedir. Esas oksitleri olan silis ve alümine ilave olarak puzolanların kimyasal yapısında demiroksit, kalsiyumoksit, alkali ve karbon bulunmaktadır. Bu maddelerin miktarları ise puzolanların elde edildiği kaynağa göre değişmektedir.

Puzolanik malzemenin yeterli bağlayıcılığı gösterebilmesi için aşağıdaki koşulları sağlamış olması gerekmektedir (Özer, 2009).

- İçerdiği silika ve alümina miktarı yüksek olmalıdır. (Çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak puzolanlardaki “SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının en az %70 olması istenmektedir.)
- Amorf yapıya sahip olmalıdır.
- Doğal haliyle çok ince taneli durumda, veya öğütülerek en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma getirilmiş olmalıdır (Erdoğan, 2004).

Puzolanik katkı maddelerinin dışında kalan her türdeki katkı maddesinin beton karışımında kullanıldıkları miktarlar çok az olmakla birlikte, puzolanik katkı maddelerinin kullanıldıkları miktarlar, genel olarak, çimento miktarının %10 -%50'si kadardır (Erdoğan, 2006). Bazı betonların yapımında, bu oran %50'nin çok üstünde de olabilmektedir. Puzolanik katkı maddelerinin yer alacağı betonda, mineral katkı kullanılmadan yapılacak betondakine kıyasla, çimento miktarında bir parça azaltma yapılmakta ve beton karışımına, azaltılan çimento miktarı kadar puzolanik katkı maddesi eklenmektedir. Böylece betondaki bağlayıcı malzeme, “portland çimentosu + puzolanik katkı maddesinden oluşturulmaktadır. Mineral katkı maddeleri, bazen, betondaki ince agreganın bir kısmını oluşturmak üzere de kullanılabilir.

Son zamanlarda çimento ve beton endüstrisinde mineral katkı özellikle de yüksek puzolanik aktifliğe sahip olan mineral katkıların kullanımında artışa şahit olmaktayız. Genel olarak beton karışımını mineral katkılarla birleştirmek; betonun mukavemetini yükseltir, termik çatlamalara dayanımını artırır, permeabilitesini azaltmak suretiyle kimyasal etkilere karşı durabiliteyi geliştirir. Beton içerisindeki malzemelerden en pahalı olanı Portland çimentosudur. Buna karşın, mineral katkıların çoğu ise

kullanımları için daha az enerji gerektiren endüstriyel ve doğal ürünlerdir. Portland çimentosunun bu katkılarla kısmi olarak yer değiştirilmesi sonucunda çimento ve betonun maliyetini düşüren önemli bir enerji tasarrufu elde edilir. Ayrıca Portland çimentosunun üretim prosesi esnasında çevreye büyük miktarlarda karbon oksit ve toz salınmaktadır. Bu faydalar, mineral katkılardan çimento ve betonda yararlanılmasındaki artışı açıklamaktadır (Özer, 2009).

### **2.2.1 Mineral katkıların çimento ve beton içerisinde kullanılması**

Çimento ve beton endüstrisinde kullanılan mineral katkıları kökenlerine göre doğal ve yapay katkılar olarak ikiye ayırmak mümkündür.

#### **2.2.1.1 Doğal mineral katkılar**

Doğal puzolanlar, yeryüzünde doğal olarak yer alan ve puzolanik özeliğe sahip olan malzemelerdir. Volkanik kül, tuf, ve diatom olarak adlandırılan mikroskopik büyüklükteki silisli alglerin kalıntılarını içeren diatomlu toprak, doğal puzolan sınıfına girmektedir. Bu malzemelerin dışında, 540 °C - 900 °C kadar pişirilme işlemine tabi tutulmuş olan bazı killer de doğal puzolanlar arasında yer almaktadır. Kilin içerisinde yeterli miktarda silika ve alümina olduğu halde, bu malzeme, doğal haliyle puzolanik davranış gösterememektedir. Bunun nedeni, kildeki minerallerin kristal yapıya sahip oluşudur. Ancak, kil, pişirilme işlemine tabi tutulduğu takdirde, kristal yapı bozulmakta ve amorf yapı elde edilmektedir. O nedenle, pişirilmiş kil puzolanik özellik gösterebilmektedir.

Doğal mineral katkılar uzun bir süreden beri çimento ve beton içerisinde kullanılmaktadır. Bu katkılardan volkanik kül, tras ve zeolit gibi bazıları puzolanik aktiflik göstermelerine karşın, kimyasal ve mineral bileşimleri, oluşum kaynakları ve şartlarına bağlı olarak çeşitlilik göstermektedirler. Bu mineral katkılar baskın olarak silika ve ek olarak da alüminyum ve ferrik oksit bileşenlerinden oluşmaktadırlar.

#### **2.2.1.2 Yapay mineral katkılar**

Çimento ve beton içerisine katılan mineral katkıların doğal kaynaklarındaki hızlı

tükenmeden dolayı günümüzde yapay mineral katkıları kullanılmaktadır. Bilim ve teknolojiye ileri adımlarla beraber yüksek puzolanik aktivite gösteren yapay mineral katkıları geliştirilmiştir (Kaymak, 2010).

Birçok farklı ülkede kullanılan yapay mineral katkıların ilkleri yüksek fırın cürufu ve uçucu kül idi. Son zamanlarda bunlara ek olarak silis dumanı ve metakaolin gibi etkili mineral katkıları çimento ve beton endüstrisine sunulmuştur. Cüruf ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların çimentoya karıştırılmasındaki başarı, maliyetlerin düşürülmesi ve harç ve betonun davranışındaki bazı iyileştirmelerden kaynaklanmaktadır. Mineral katkıların kimyasal ve mineral bileşimleri, katkıların kaynaklarına ve formasyonları esasındaki ortam şartlarına bağlı olarak değişmektedir (Kaymak, 2010).

İnşaat teknolojisinde en sık kullanılan puzolanlar, uçucu küllerdir. Modern enerji santrallerinde kömür, yüksek ısıdaki fırınlardan geçirilir. Uçucu maddeler ve karbon yanarak yok olurken, kömür içerisindeki kil, kuvarz ve feldspatlar eriyerek birleşirler. Bu ergimiş madde, düşük sıcaklıktaki kısımlarda soğutulup katılaştırılarak küresel parçacıklara dönüşür. Bu mineral maddenin bir kısmı, tabanda bir kül yığını olarak toplanırken, büyük çoğunluğu uçucu gazlarla birlikte uçarlar. Bu uçucu kısım, uçucu kül olarak adlandırılır. Uçucu küller, hava kirliliğini önlemek amacıyla baca çıkışlarında elektrostatik filtrelerle gazdan ayrılarak toplanırlar (Ramachandran, 1984).

Çimento ve betonda kullanılan cüruf temelde yüksek fırın cürufudur. Yüksek fırın cürufunun ana öğeleri  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$ 'dur. Bununla birlikte ikincil öğeler ise  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{P}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cl}$  ve  $\text{F}$ 'dir. Bunlar aşağıdaki oranlarda bulunurlar (Kaymak, 2010).

Cüruf; kimyasal bileşimleri, başlangıç soğuma sıcaklıkları ve soğutulma metodlarına dayalı olan kristal ve cam fazlarından oluşurlar. Cürufun kristal fazları melilit, gelenit veya okermanit, mernitit ve henitit'tir. Cam fazı kristal faza kıyasla daha yüksek reaktifliktedir. Puzolanik aktivite genel olarak; çözünebilir  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriği, yapı,  $\text{CaO}$  içeriği ve cürufun partiküllerin boyut dağılımı ve yüzey alanı ile saptanır (Kaymak, 2010).

Silis dumanı, silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur (Yeğınobalı, 2003).

Silis dumanı, amorf yapıya sahip, çok ince taneli malzeme olduğundan ve yüksek miktarda SiO<sub>2</sub> içerdiğinden, mükemmel bir puzolanik malzemedir. Diğer puzolanik malzemeler gibi, kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiği takdirde, hidrolik bağlayıcılık göstermektedir. Silis dumanı, portland çimentosu klinkeri ile ve küçük miktarda alçıyla birlikte öğütülerek “silis dumanlı çimento” (çimento-silika füme) üretiminde kullanılır. Ancak, asıl kullanımı, beton katkı maddesi şeklindedir. Çok ince taneli olması ve yüksek miktarda SiO<sub>2</sub> içermesi nedeniyle akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılarak oldukça yüksek dayanımlı betonlar elde edilir (Özgür, 1996).

Metakaolin, saflaştırılmış kaolin veya kaolinit killerinin belirli bir sıcaklık aralığında yakılması ve sonrasında yüksek inceliğe sahip olması amacıyla öğütülmesi sonucu elde edilen bir reaktif alümino-silikat puzolanıdır (Vu, 2002). Beton üretiminde kullanılan puzolanların çoğu endüstriyel atık malzemeler veya yan ürünlerdir. Metakaolin bu amaç için üretilen puzolanik bir malzemedir. Metakaolinin çimento harcında puzolan amaçlı olarak kullanımı ise 1960’lı yıllara dayanır. 1990’lı yıllardan itibaren ise sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle beton üretiminde kullanımı yaygınlaşmıştır (Özer, 2009).

### **2.3 Uçucu Kül**

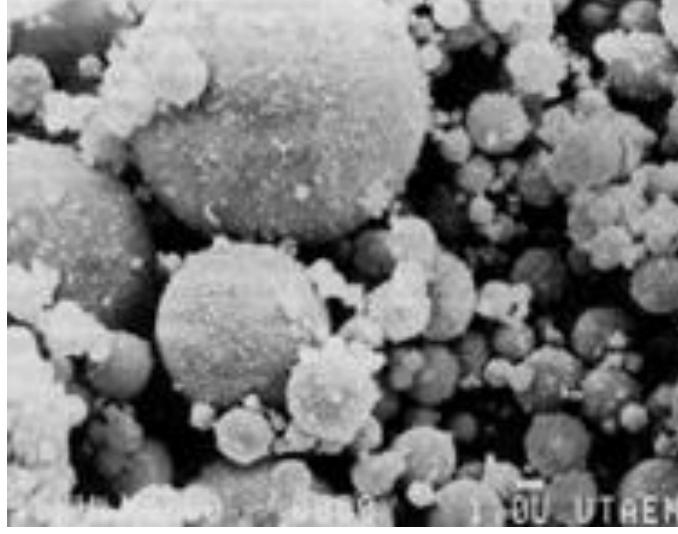
Uçucu kül, elektrik üreten termik santrallerde toz haline getirilmiş taş kömürünün ya da linyitin yakıt olarak kullanılmasından sonra ikincil bir ürün olarak elde edilir. Termik santral fırınlarında yanan öğütülmüş yakıttan dolayı oluşan küllerden bir kısmı sıcaklığın etkisi ile yüksek bacalardan dışarı doğru uçuşurlar. Uçucu kül olarak adlandırılan bu atık madde mekanik filtreler ya da elektronik toplayıcılar vasıtasıyla toplanır. Böylece, uçucu küllerin bacadan çıkıp civar bölgeleri kirletmesi de engellenmiş olur. Uçucu külün puzolanik özelliğe sahip olduğu bilinmektedir (Erdoğan, 1997). Bu özelliklerinden dolayı son zamanlarda uçucu küller çimento içinde katkı maddesi olarak beton üretiminde kullanılmaktadır.

Uçucu kül terimi 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi endüstrisinin yayılmasıyla ortaya çıkmış ve uçucu külün portland çimentosu içinde kullanımı yine bu tarihlerde başlamıştır. 1937 yılında R.E. Davis California Üniversitesi'nde uçucu küllü betonla ilgili araştırma sonuçlarını yayınlamış ve bu çalışma ilk şartnamelerin, test metotlarının ve uçucu kül kullanımının temelini oluşturmuştur (Özcan, 1997). 1989'da dünyada uçucu kül üretimi 400 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Eski Sovyetler Birliği 90 milyon ton ile en büyük üreticidir. Dünyada diğer uçucu kül kaynakları Amerika Birleşik Devleti 80 milyon ton, Çin 60 milyon ton, Hindistan 45 milyon ton, Polonya 25 milyon ton, Almanya 20 milyon ton, Türkiye 15 milyon ton, İngiltere 15 milyon tondur. (Malhotra, 1996).

Uçucu küllerin betonda kullanımına yönelik araştırmalar Türkiye'de 1960'lı yıllarda başlamıştır. Türkiye Hazır Beton Birliği'nin verilerine göre 2006 yılında ülkemizde uçucu kül üretimi yaklaşık 15 milyon ton olmakla birlikte bunun 600 bin tonu betonda kullanılmaktadır. Özellikle Kahramanmaraş, Afşin-Elbistan Termik Santrali'nde oluşan uçucu küller hiç kullanılmadan çevreye atılmaktadır. Türkiye' de elde edilen uçucu küllerin %6 sı beton üretiminde olup diğer alanlarla birlikte genel kullanım %10' u geçmektedir (Ünal ve Uygunoğlu, 2004).

Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için, uçucu küller de ince taneli doğal puzolanlar gibi puzolanik özellik göstermektedirler; kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır. Bu nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar. Genellikle beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilirler (Erdoğan, 2003).

Hem taze ve sertleşmiş haldeki bazı özelliklerini iyileştirmek, hem de üretimde ekonomikliliği sağlamak amacıyla betonda çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Küresel tane şekliyle taze betonda işlenebilmeyi iyileştiren, pompalanabilme ve kohezyonu artıran uçucu kül puzolanik özelliği nedeniyle de sertleşmiş betonda dayanım ve dayanıklılığı arttırabilmektedir (Özturan, 2007).



**Fotoğraf 2.1.** Uçucu külün iç yapısı

Betonda uçucu kül kullanımı pek çok avantaj sağlar. Uçucu küllerin kullanımıyla elde edilebilecek yararlar yalnızca çevre koruma ve enerji tasarrufu ile sınırlı değildir. Uygun özelliğe sahip uçucu külün betonun ekonomik ve uzun ömürlü performansı üzerine olumlu etkisi vardır. Uçucu külün betonda katkı maddesi olarak kullanılması özellikle kütle yapılarında daha pratik ve ekonomik olduğu çeşitli kaynaklarda belirtilmiştir (Ünal ve Uygunoğlu, 2004).

### **2.3.1 Uçucu külün üretimi**

Elektrik enerjisi üretimi için, termik santrallerin çoğunda yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır. Kömür, %80'i 75 µm elekten geçebilecek inceliğe sahip olacak şekilde öğütülmekte ve havayla birlikte buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla, yakıt olarak püskürtülmektedir (Cook, 1983).

Pulverize kömürün yanmasıyla büyük bir miktarı çok ince olan, bir miktarı da nispeten biraz daha iri boyutlara sahip kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Çok ince tanelere sahip olan küller, yakıt gazlarıyla beraber uçarak bacadan çıkmak üzere hareket ederler. Nispeten ağır olan iri kül tanecikleri taban külü olarak ocağın tabanına düşer. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık %75-80'i gazlarla birlikte bacadan çıkma

eğilimi gösteren çok ince taneli küllerdir. Bu küllere uçucu kül denilmektedir (Erdoğan, 2003).

Gazlarla birlikte çok büyük miktarda külün dışarı çıkması durumunda, termik santralin çevresi kısa sürede küllerle kaplanacağından, bacadan dışarıya çıkacak küller birtakım elektrostatik veya elektromekanik yöntemler vasıtasıyla tutulmakta ve kül toplayıcı silolara kanalize edilmektedir. Daha sonra da silolardan konveyör bandlar yardımıyla veya başka yöntemlerle termik santrallerin uzağındaki bir yere atık olarak depolanmaktadır (Erdoğan, 2003).

Uçucu küllerin özellikleri yakılan kömüre, kullanılan kazan tipine, yakma ve kül toplama metodu gibi faktörlere bağlı olarak her termik santral için hatta aynı santraller için bile farklılıklar gösterebilmektedir. Önemli noktalardan biri de, uçucu külün kireç olmadan bağlayıcılık özellik gösteremeyeceğidir. Uçucu küller çimentoya göre daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olduklarından dolayı bağlayıcı hamurun hacminin artmasını ve daha az çimentonun kullanılmasını sağlamaktadırlar (Topçu, 2006).

### 2.3.2 Uçucu kül sınıfları

Uçucu küller kimyasal ve minerolojik kompozisyonları ve CaO içeriklerine göre düşük ve yüksek kireç içerikli olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. ASTM C 618 (1994), düşük ve yüksek kireç içerikli uçucu külleri sırasıyla F ve C sınıfı olarak ayırmaktadır. F sınıfı uçucu küller taşkömüründen elde edilen kaliteli uçucu küllerdir, C sınıfı uçucu küller ise linyitlerden elde edilmektedir ve nispeten düşük kaliteli küllerdir. Zengin linyit rezervlerine sahip olan ülkemizdeki uçucu küller büyük oranda C tipi küllerdir (Akman vd., 1994). Çizelge 2.1’de ASTM C 618’ye göre Uçucu kül sınıfları gösterilmiştir.

**Çizelge 2.1.** ASTM C 618 (1994)’e göre uçucu kül sınıfları (Erdoğan, 2003)

Sınıf	Tanım
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$ ; antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilmekte, puzolanik özelliğe sahip.
C	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$ ; linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilmekte, puzolanik özelliğin yanı sıra kendiliğinden bir miktar bağlayıcılığa sahip.

Kimyasal yapıları bakımından diğer uçucu külleri üç ana sınıfta ayırmak mümkündür.

### **2.3.2.1 Siliko-alüminalı uçucu küller**

Kimyasal Yapılarının büyük bir kısmını (%80-90) SiO<sub>2</sub> (silis) ve bir miktar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> meydana getirmektedir. Kireç ile birlikte sulu ortamlarda mükemmel bir bağlayıcı oluşturmaktadır. Bu uçucu küller, içerdikleri alkali ve toprak alkali element oksitleri nedeniyle çok ince taneli ve camsı yapıya sahiptir. Genellikle taş kömürü uçucu külleridir.

### **2.3.2.2 Siliko-kalsik uçucu küller**

Adından da anlaşılacağı üzere yapılarındaki ana oksitler SiO<sub>2</sub> (silis) ve CaO (kireç) 'tir. Ancak CaO miktarı oldukça yüksektir. Bazı durumlarda ilave kirece gerek kalmaksızın, kendiliğinden bağlayıcı oluştururlar. Diğer bir anlamda zayıf bir bağlayıcılık özellikleri vardır.

### **2.3.2.3 Sülfö-kalsik uçucu küller**

Yapısının büyük bir bölümü SO<sub>3</sub> ve CaO' den meydana gelmektedir. Bunlarda Siliko-Kalsik Uçucu Külleri gibi sulu ortamlarda kendiliklerinden sertleşebilmektedirler. Bazı tür linyitlerin uçucu külleri bu sınıfa girmektedir. Ancak belirtilmelidir ki; her taş kömürü uçucu külü Siliko-Alüminalı ve her linyit uçucu külü Sülfö-Kalsik bir kül değildir. Örneğin, bir taş kömürü uçucu külünde, silis ve alümina oranı düşük ve kireç oranı yüksek olabilir (Özdemir, 2007).

### **2.3.3 Uçucu külün özellikleri**

Uçucu külün kullanılmasıyla betonun birçok özelliğinin değiştiği bilinen bir gerçektir. Bunlardan taze betonun reolojik özellikleri ve Portland çimentosunun hidrasyon hızı gibi konular uçucu külün fiziksel nitelikleriyle (tane büyüklüğü, gradasyon) ilgiliyken; dayanım artışı, geçirimsizlik, hidrasyon ısı, alkali-agrega reaksiyonu, sülfat etkisine dayanıklılık gibi özellikler ise kullanılan külün kimyasal ve mineralojik kompozisyonlarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, uçucu küllerin, betonda

kullanılabilirliğinin belirlenebilmesi açısından, minerolojilerinin bilinmesi gerekmektedir (Tokyay, 1989).

### **2.3.3.1 Uçucu külün fiziksel özellikleri**

Uçucu küller, çimentodan daha koyu gri renkte, çok ufak taneli, elle dokunulduğunda yumuşak bir malzemedir. Renkleri açık griden koyu griye uzanan değişikliktedir. Daha çok miktarda karbon içeren küller koyu gri renkte, daha çok demir içerenler ise açık gri renktedir (Erdoğan, 2003).

Mikroskopta bakıldığında çeşitli şekilde ve büyüklükte, çeşitli biçimlerde, genellikle küresel, şeffaf, bazen açık renkli, bir kısmı siyah, çok az esmer kırmızı renkte taneciklerden meydana gelen bir yapı gösterir (Demir, 1989).

Uçucu küller genelde küçük, camsı, oyuk yapı, 0,01-100 µm arasında tane boyutuna sahip ve yoğunluğu 2,1 ile 2,6 g/cm<sup>3</sup> arasında değişen taneciklerdir (Adriano vd., 1980).

Yüzey alanları oldukça yüksektir ve tane boyutuna göre yaklaşık 1-16 m<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> arasında değişir. Uçucu küllerin ısısal ve elektriksel iletkenlikleri içi boş küresel mikro yapılarından dolayı çok düşüktür ve bu yüzden iyi birer yalıtıcıdır (Schure, 1985).

### **2.3.3.2 Uçucu külün kimyasal özellikleri**

Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları, yakıt olarak kullanılan kömürün tipine ve yanma işlemine göre değişiklik göstermektedir. Çizelge 2.2’de değişik termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin içerikleri görülmektedir. Buradan görülebileceği gibi, birçok uçucu küldeki “SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>” miktarı %85’in üzerindedir. Bu oksitlerin yanı sıra bir miktar CaO, MgO, cüruf (çok ince taneli durumda olan yanmamış kömür) ve Na<sub>2</sub>O da bulunabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Uçucu küldeki yüksek kalsiyum varlığı külün minerolojik karakteristiklerini ve reaktivitesini değiştirir. Birinci olarak uçucu külün ana bileşeni; örneğin cam yapısında daha fazla kalsiyuma sahip olur. İkinci olarak, ikincil bileşenler; örneğin C<sub>3</sub>A, CS ve C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S gibi kristal bileşikler yüksek reaktivitedir. Bu kristal bileşikler çimentolaşır,

çünkü hidratasyon ürünü oluşturmak için çimentonun kalsiyum hidroksidine ihtiyaçları yoktur.

Sonuç olarak yüksek kalsiyumlu uçucu küller düşük kalsiyumlu uçucu küllerle kıyaslandığında yalnızca puzolanik davranış bakımından daha aktif değildiler, aynı zamanda çimentolaşırlar. Kalsiyumun önemli rolü uçucu külün davranışının değiştirmesidir, bu da uçucu külü sınıflandırırken kalsiyum içeriği dikkate almayan standart şartnameler için süprizdir (Mehta, 1986). Uçucu kül taneleri arasında bulunan yanmamış karbon kızdırma kaybı olarak da bilinmektedir. Bu sebeple, tabloda karbon miktarı “kızdırma kaybı”na eşdeğer olarak gösterilmektedir. Kızdırma kaybı tayini için yüksek sıcaklıklara kadar pişirilen uçucu kül numunesindeki ağırlık kaybı, büyük oranda, külün içerisindeki karbonun yanmasından kaynaklanmaktadır (Erdoğan, 2003).

**Çizelge 2.2.** Çeşitli uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları (Erdoğan, 2003)

Kimyasal içerik	F sınıfı uçucu kül (CaO < %10)	C sınıfı uçucu kül (CaO > %10)
SiO <sub>2</sub>	43.6 - 64.4	23.1 - 50.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.6 - 30.1	13.3 - 21.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.8 - 23.9	3.7 - 22.5
CaO	0.7 - 6.7	11.5 - 29.0
MgO	0.9 - 1.7	1.5 - 7.5
Na <sub>2</sub> O	0 - 2.8	0.4 - 1.9
C (kızdırma kaybı)	0.4 - 7.2	0.3 - 1.9

### 2.3.4 Uçucu küllerin kullanım alanları

Bütün dünyada bir yılda üretilen toplam uçucu küllerin ancak % 25’den daha azı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte Almanya, Hollanda ve Belçika’da üretilen toplam uçucu kül’ün % 95’den fazlası, İngiltere’de ise yaklaşık % 50’si kullanılmaktadır. Diğer taraftan büyük miktarlarda uçucu kül üretilen A.B.D. ve Çin’de sırasıyla yaklaşık % 32 ve % 40 oranında uçucu kül kullanıldığı görülmektedir (Bhattacharjee ve Kandpal, 2002).

Uçucu küllerin çeşitli kullanım alanlarında değerlendirilerek ülke ekonomisine kazandırılması ile mümkün görünmektedir. Uçucu küllerin değerlendirildiği sektörlerin başında ağırlıklı olarak inşaat sektörü gelmektedir. Bunun dışında uçucu kül, kimya,

seramik, cam, camseramik, döküm-metal sanayii, tarım sektöründe zemin ıslahı, çevre, sondaj çalışmaları, buzlanmanın önlenmesi ve maden ocaklarında olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Erdoğan, 2003).

#### **2.3.4.1 Çimento ve beton üretiminde kullanımı**

İnşaat sektöründe UK'un yaygın olarak kullanıldığı alanların başında çimento sanayisi gelmektedir. 1980'li yıllardan itibaren Türkiye'de katkılı çimentoların çimento üretimindeki payı, % 90'ların üstüne çıkmıştır (Öztekin, 1987).

Çimento yapımında kullanılan hammaddeler CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olmak üzere başlıca dört bileşiği içerirler. Uçucu küllerde de değişik oranlarda aynı bileşikler bulunduğu için çimento üretiminde kullanılmaktadırlar. Puzolanik özellik gösteren uçucu küller, çimento ile birlikte kullanıldıklarında, çimentonun hidrasyonu sırasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanırlar. Uçucu küller, beton yapımında kullanıldıkları zaman, betonun yüzey temizliği ve işlenebilirlik özelliği iyileşmektedir. Aynı zamanda betonun su geçirgenliği ve büzülme oranı azalırken dayanımı artmaktadır (Özdemir, 2007).

#### **2.3.4.2 Tuğla üretiminde kullanımı**

Tuğla üretiminde kullanılan kiler SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O ve TiO<sub>2</sub>' den meydana gelmektedir. Uçucu küllerde aynı oksitleri içerdikleri için tuğla üretiminde kullanılabilirler. Uçucu küllerin tuğlalarda kullanılması ile, tuğlaların kuruma ve pişme küçülmeleri azalmaktadır. Aynı zamanda uçucu küllerin içerdikleri karbon, tuğlaların pişirilmesinde enerji tasarrufu sağlamaktadır (Özdemir, 2007).

#### **2.3.4.3 Hafif agrega üretiminde kullanımı**

Hafif agregalar, hem doğal olarak hem de bazı malzemelere uygulanan çeşitli prosesler sonucunda elde edilebilir. Uçucu küller 1100-1200°C' de bir miktar ergime göstererek ve uygulanan sertleştirme yöntemine bağlı olarak yuvarlak veya silindirik taneli agregalar oluşturmaktadır. Doğal agregaya oranla daha hafif olan bu agregaların kullanılması ile hafif beton elde edilmektedir. Bu şekilde yapılan betonlar, normal

ağırlıklı betonlar kadar yüksek dayanıma sahip olmaktadır. Bunun yansıra, ısı ve ses iletkenliği düşük malzeme elde edilebilmekte ve hafifliği nedeniyle işçilik kolaylaşmaktadır (Öztürk, 2001).

#### **2.3.4.4 Yol yapımında ve geoteknik uygulamalarda kullanımı**

Uçucu kül, yol yapımı ve geoteknik uygulamalarda genellikle iki şekilde kullanılmaktadır; dolgu malzemesi olarak ve toprak stabilizasyonunu sağlamak amacıyla temel malzeme olarak. Uçucu küller sıkıştırıldıkları zaman diğer dolgu malzemelerine nazaran daha düşük bir yoğunluğa sahip olurlar. Bu durum, özellikle sıkıştırılabilme özelliği yüksek uçucu küllerin yüksek zeminler üzerinde daha uygun bir dolgu malzemesi olarak kullanılabilceğini gösterir (Özdemir, 2007).

Sızdırmazlık sağlamak amacıyla atık depolama sahalarında, yol kaplaması altındaki dolgu tabakası yapımında, donatılı zemin duvarlarda, duvarın arka dolgusu olarak ve ayrıca çöp atık sahaları üzerinde yapılan beton kaplama veya döşemelerdeki farklı oturma hasarlarının onarımı için kireç ile birlikte enjeksiyon uygulamasında kullanılmaktadır (Wasti, 1993). Deneysel bir araştırma, yol dolgularının yapımında uçucu kül'ün çimento ile birlikte pratik olarak kullanılabilceğini göstermiştir (Kamon, 2000).

#### **2.3.4.5 Seramik ve cam üretiminde kullanımı**

Uçucu küller, kil ve feldispat ilavesi yapılarak, geleneksel (tabak, fincan v.s.) ve sanatsal (vazo, küllük, süs eşyaları) seramiklerin üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu küller seramik sanayinde kullanıldığında bir takım avantajları beraberinde getirmektedir. Bunlar, tane boyutunun küçüklüğü, öğütme masraflarının olmayışı, maliyetinin çok düşük olması ve içerdiği karbonun pişirme işlemleri sırasında sağladığı enerji şeklinde sıralanabilir. Uçucu küller ayrıca, son zamanlarda üzerinde çok çalışılan ve geniş kullanım alanı bulan cam seramiklerin üretiminde de kullanılmaktadır (Özdemir, 2007).

### 2.3.5 Uçucu Külün Beton Özelliklerine Etkileri

Uçucu külün beton karışımında kullanımı taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini oldukça etkiler. Taze betonun su ihtiyacı, işlenebilirliği, priz zamanı, bitirilebilme özelliği, hidrasyon ısı ve kanama uçucu külün kullanımı sonucu etkilenir. Katılmış betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri de uçucu külün beton karışımında kullanılmasıyla etkilenen önemli özellikleridir. Uçucu küllerin beton özellikleri üzerine olan etkileri aşağıda başlıklar halinde özetlenmiştir (Karahan, 2006).

Uçucu küllerin beton özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Erdoğan, 2003).

#### Olumlu Etkileri

- Taze betonda işlenebilmeyi artırmakta, terlemeyi azaltmaktadır.
- Betonun hidrasyon ısını azaltmaktadır.
- Sertleşmiş betonun sülfatlara dayanıklılığını arttırmaktadır.

#### Potansiyel Zararlı Etkileri

- Betonun prizini biraz geciktirmektedir, bu durum soğuk havalarda sorun olabilmektedir.
- Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltmaktadır.
- Betonun daha uzun süre kür edilmesini gerektirmektedir.
- Betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok miktarda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmasını gerektirmektedir.

### 2.3.6 Uçucu Kül İkame Metotları

Birçok araştırmacı karışım oranları ve uçucu külün ikamesi ya da beton karışımına katılması konusunda çalışmalar yapmışlardır. Uçucu kül ikame metotları aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır (Munday vd., 1983).

### **2.3.6.1 Basit ikame metodu**

Bu metotta, kontrol karışımının çimentosunun bir kısmı yerine hacimce veya ağırlıkça eşit miktarda uçucu kül konularak uçucu küllü beton üretilmektedir. Bu metod kolaylığından dolayı birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır, örneğin (Atiş vd., 2002) Literatürde uçucu küllü betonlarla çalışma yapan birçok araştırmacı uçucu küllü çimentonun %10'u ile %30'u aralığında ikame etmektedir Bu yüzden şartnamelerde %30'a kadar olan yer değiştirme oranları normal yer değiştirme seviyesi olarak kabul edilmiştir, %30'dan fazla ikame ise yüksek hacimli uçucu kül ikamesi olarak hesaba katılır (Sevim, 2003).

### **2.3.6.2 Değiştirilmiş ikame metodu**

Basit ikame metodu ile dizayn edilen beton karışımlarının erken dayanım düşüklüğü, araştırmacıları yeterli erken yaş dayanımı veren bir başka ikame metodu bulmaya itmiştir. Bu yüzden Dunstan (1984), tarafından düşük erken yaş dayanımının üstesinden gelen ve basit ikame metodunu modifiye eden çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bütün metotlarda ortak göze çarpan özellik, karışıma konan uçucu külün fazla konulan miktarı ince agrega yerine kullanılır.

### **2.3.6.3 Rasyonel oranlama metodu**

Uçucu küllü betonun şartnamelerdeki işlenebilirlik ve mukavemet şartlarıyla uyuşması gerektiği gerçeği, betonun bu özelliklerini etkileyen uçucu kül karakteristiklerini göz önüne almak gerektiğini ortaya koymuştur.

Bu metodun ilk defa Smith tarafından önerildiği kabul edilmektedir. Bu metodun modifiye edilmiş ikame metodundan farkı 'k' etkinlik faktörünün tanımlanmış ve kullanılıyor olmasıdır. Smith, ağırlığı F olan uçucu külün  $kxF$  olan çimentoya eşdeğer olduğunu ve buradaki 'k' değerinin bağlayıcı etkinlik faktörü olduğunu belirtmiştir. Burada uçucu külün puzolanik aktivitesi dikkate alınmaktadır. Buna göre etkinlik faktörü k; uçucu kül miktarını eşdeğer çimento miktarına çeviren katsayı olarak tanımlanabilir (Berry, 1986).

## 2.3.7 Taze beton özellikleri üzerine etkileri

### 2.3.7.1 İşlenebilirlik

Uçucu külün taze beton karışımı üzerindeki yaygın olarak bilinen etkilerinden biri, betonun işlenebilirliğini azaltmadan, gerekli su miktarını azaltma kabiliyetidir. Uçucu külün beton karışımı üzerindeki bu etkisi genellikle fiziksel özelliklerine, karbon içeriğine, tane inceliğine, şekline ve özellikle tane yüzey yapısına bağlıdır (Atiş vd., 2002).

Uçucu külün kullanımı bağlayıcı hamurun hacmini artırır. Uçucu kül çimentonun kısmi bir yer değişimi ağırlık bazında yapıldığında, uçucu külün yoğunluğu çimentodan az olduğundan, yer değişimde bağlayıcı maddenin hacminde bir artış olmaktadır. Boşlukların yeterli miktarda bağlayıcı hamuru ile doldurulması sonucu yapışkanlık, plastiklik ve agrega tanelerinin kayganlığı sağlanır. Uçucu küllerin inceliği ve tanelerinin küresel olması işlenebilirlik üzerinde faydalı etkilere sahiptir. Küresel şekil agregalar arasındaki sürtünmeyi bilyalı-yatak etkisi ile azaltmakta ve betonun daha rahat hareket etmesini sağlamaktadır. İnce taneler boşlukların daha iyi dolmasını sağlar ve perdelanmayı kolaylaştırır. Aynı zamanda uçucu külün tanelerinin küresel şekli, agregalar arasındaki sürtünmeyi azaltır, dolayısıyla beton ve pompa hattındaki sürtünmeyi azalttığından betonun pompalanabilirliğini arttırmaktadır (Karahan, 2006).

Malhotra (1987), uçucu külün tane çapının  $45 \mu\text{m}$ 'yi aşması durumunda işlenebilmedeki pozitif etkisinin kaybolduğunu ifade etmektedir. Mora vd. (1993), uçucu kül çapının  $10 \mu\text{m}$ 'nin altına inmesi halinde de işlenebilmenin güçlendiğini bildirmektedirler.

Hassan vd. (1997), beton karışımında çimentonun her %10'nun Uçucu Kül ile yer değiştirilmesi, su ihtiyacını %3-4 oranında azalttığını belirtmektedirler. Böylece boşluk oranının önemli derecede azaldığını vurgulamaktadırlar.

Gökçe vd. (1996), uçucu külü çimentoyla %10, %20 ve %30 oranlarında yer değiştirerek kullandıkları çalışmalarında, uçucu kül taneleri irileştikçe ve ikame oranı arttıkça, betonun sabit işlenebilirliği için gerekli olan su miktarının arttığını bildirmişlerdir. Taneler irileştikçe su ihtiyacının artmasının ana sebebinin, tanelerin

fiziksel yapısından kaynaklandığı belirtilmiştir. Taramalı elektron mikroskopundan elde edilen görüntülere göre, ince uçucu kül tanesi bilinen tipik küresel ve dolu yapıya sahiptir. Uçucu kül tanesi irileştikçe, amorf bir yapıya sahip olmaktadır ve bu yapı, taze betonda iç sürtünmeyi ve su ihtiyacını artırmaktadır.

### **2.3.7.2 Priz süresi**

Betonun priz zamanı karakteristiği; çimento tipi, çimento miktarı, çimento inceliği, çimento hamurunun su muhtevası, eriyebilir alkaliler, diğer katkıların kullanımı, uçucu külün miktarı, inceliği ve bileşenleri gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir. Uçucu küllü beton, diğer bütün puzolanik betonlar gibi, daha uzun priz zamanına sahiptir. Uçucu külün priz zamanı üzerindeki etkisi uçucu külün karakteristiklerine ve kullanıldığı miktara bağlıdır. Uçucu kül betonlarının priz zamanının normal betona göre daha uzun olmasından dolayı, bu tür betonun bitirilmesi normal betona göre daha geç yapılmalıdır.

Uçucu kül katkılı betonların priz süreleri katkısız betonlara göre genellikle daha uzun olmaktadır. Priz süresi, kullanılan uçucu külün tipine ve inceliğine göre değişmektedir. C tipi uçucu küller, F tipi uçucu küllerden daha kısa priz süresi göstermektedirler (Erdoğan, 2003).

### **2.3.7.3 Hidratasyon ısısı**

Çimentonun uçucu kül ile kısmen yer değiştirmesi ile karışımda daha az Portland çimentosu yer alacağından dolayı, betonun erken yaşlardaki hidratasyon ısısı düşmektedir. Çimento hamurunun hidratasyon ısısının azaltılmasında, yüksek kalsiyum içeren uçucu küller, düşük kalsiyum içeren uçucu küller kadar etkili değildir (Erdoğan, 2003).

Poon vd. (2000), çalışmalarında düşük su/bağlayıcı oranı kullanıldığında, %20'lik bir uçucu kül katkısının, yüksek hidratasyon ısısını durdurmak için yeterli olmayabileceğini vurgulamaktadırlar.

#### **2.3.7.4 Kanama (Terleme)**

Uçucu küllerin ince ve küresel taneciklerden meydana gelmesi kuma ve ayrışmayı azaltan bir faktördür. Agregalar arasına yerleşen uçucu kül tanecikleri kuma kanallarının daralmasına neden olarak bu etkiyi yaratırlar (Tokyay vd., 1990).

Uçucu küllü beton karışımı genelde normal betona göre daha az kanama gösterir. Bunun nedeni ise, betondaki katı madde yüzey alanının su hacmine oranının artmasıdır. Uçucu külle yapılan hamur daha az sulu ve ayrışmaya daha az meyillidir (Karahana, 2006).

#### **2.3.8 Sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkileri**

##### **2.3.8.1 Basınç ve çekme dayanımı**

Uçucu külün betonun mukavemet gelişimine etkisi, kullanılan uçucu külün miktarı, kalitesi, su-bağlayıcı oranı ve kür şekli gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Uçucu külün puzolanik reaksiyonundan dolayı, uçucu kül içeren betonun dayanım gelişimi genellikle ilk zamanlarda daha yavaştır. Ancak nihai dayanım oldukça yüksektir. İlk günlerdeki dayanım artışı, uçucu külün inceliğine ve tipine göre değişiklik göstermektedir. C tipi küllerin ilk zamanlardaki dayanıma katkısı, F tipi küllerinkinden daha fazladır. Ayrıca, incelik arttıkça, ilk zamanlardaki dayanım nispeten daha yüksek olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Beton karışımı içinde uçucu kül kullanımı genelde su ihtiyacını azaltmakta, bağlayıcı madde içeriğini artırmakta ve uzun dönemde puzolanik aktivite yoluyla dayanıma katkıda bulunmaktadır. Uçucu külün katılaşma oranının yavaş ve erken yaşlarda basınç dayanımı kazanımını azalttığını bilinmektedir. Bu durum uçucu külün çimento ile kısmen yer değişimi yaptığı zaman geçerlidir ve bağlayıcı olarak görev görür. Eğer, bir beton karışımında bağlayıcı malzeme miktarı sabit ise ve bu bağlayıcı miktarının bir kısmı uçucu kül ile yer değiştirilmiş ise; basınç dayanımı uçucu kül miktarının artmasıyla daha da düşer. Diğer taraftan, uçucu küllü betonun dayanımı ve dayanım kazanma oranı kullanılan uçucu külün miktarına, karakteristiklerine ve kullanılan çimentoya kuvvetlice bağlıdır. Yüksek kireçli uçucu kül daha yüksek reaksiyon oranı ve yüksek dayanımı düşük kireçli uçucu küle nazaran erken yaşlarda gösterir. Genelde,

bütün betonların dayanım ve dayanım kazanma oranı kür edilme zamanı tarafından etkilenmektedir.

Uçucu küllü beton normal betona göre daha uzun kür edilme zamanı isteyebilir (Karahana, 2006). Atış vd. (2002), uçucu küllü betonların basınç ve yarmada çekme dayanımları üzerinde yaptıkları araştırmalarında, uçucu külün ağırlıkça %10-20 oranlarında çimento yerine ikamesiyle üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımlarının şahit betonlara eşdeğer ya da daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Silindir yarmada çekme dayanımlarının ise oldukça tatminkar olduğu belirtilmektedir. Uçucu kül içeren beton numunelerin basınç ve çekme dayanımları arasındaki ilişkinin normal betona benzediği görülmüştür.

Atış vd. (2002), %10-20 oranlarında uçucu küllü harç numunelerin bir günde oldukça tatminkar basınç ve eğilme-çekme dayanımı geliştirdiğini, basınç dayanımlarının 28 günde kontrol betonuyla kıyaslanacak duruma geldiğini belirtmişlerdir.

Yapılan araştırmalarda, ağırlıkça %20 oranında uçucu kül kullanılmasının beton basınç dayanımı açısından olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Erdoğan, 2003).

Uçucu küllerin betonun çekme ve eğilme mukavemetlerine olan etkileri, basınç mukavemetine paralellik göstermektedir (Özturan, 1991). Gökçe vd. (1996), uçucu külün %10-20 oranlarında çimentoyla yer değiştirilerek kullanılmasının, dayanımı olumsuz etkilemediğini, bu durumun basınç ve eğilme dayanımlarında benzer olduğunu belirtmektedirler. Ancak %30 ikame oranlı betonların dayanım gelişimini istenilen düzeyde tamamlamadıklarını bildirmişlerdir.

### **2.3.8.2 Rötire**

Rötire, su-çimento oranına, beton karışımındaki çimento yüzdesine ve rötreyi önleyen agreganın karışım içindeki oranına bağlıdır. Düşük su-çimento oranı ve beton karışımında çimento miktarının azalması rötreyi de azaltmaktadır (Neville ve Brooks, 1993).

Uçucu kül çimento ile kısmen yer değiştirilerek çimento miktarını azalttığından ve karışım suyu ihtiyacını azaltma kabiliyetinin kullanılmasından dolayı, uçucu kül katkılı betonlarda rötre daha düşük olmaktadır (Nelson vd., 1992). Karbon oranı az ve inceliği yüksek olan uçucu küllü betonların rötresi, katkısız betonlara göre daha az olabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Atiş vd. (2004)'a göre, %10, %20, %30 oranlarında çimento yerine yüksek kalsiyumlu UK kullanarak hazırlanan harçların kuruma rötrelere göre sadece PÇ'li harçlara kıyasla %30-%40 oranında azalmaktadır, %40 oranında yüksek kalsiyumlu UK içeren harçlar ise büzülme yerine genişlemektedir.

Bai vd. (2005), ince agrega yerine %0, %30, %50, %70 ve %100 oranlarında UK kullanmışlardır. Sabit su/çimento oranında UK miktarının artmasıyla hem dayanımın hem de rötrenin azaldığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte sabit slump değeri kullanıldığında dayanımının kontrol betona yakın, rötrenin ise %30'dan fazla uçucu kül kullanılması halinde arttığını belirtmişlerdir.

### **2.3.8.3 Elastisite modülü**

Carette ve Malhotra (1987), uçucu küllü betonların 28 günlük elastisite modüllerinin, kontrol betonunun elastisite modülünün %90-110'u arasında olduğunu rapor etmişlerdir.

Ramyar (1993), uçucu kül ikamesinin, betonun elastisite modülü üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını bildirmiştir. Yazıcı ve Baradan (1995), %25 uçucu kül ikamesinin, basınç dayanımı ve elastisite modülünü düşürürken, çekme ve eğilme dayanımlarını çok az bir miktar arttırdığını belirtmişlerdir.

### **2.3.9 Betonun dayanıklılık özelliklerine etkileri**

Beton genelde dayanıklı bir malzeme olmasına karşın, sert çevre koşullarında bu dayanıklılığını yitirir. Fiziko-kimyasal etkilerle yapısı bozulur, deformasyona uğrar. Buna bağlı olarak, mukavemeti düşer ve görevini yapamaz. Çevre koşullarının etkilerini beton üzerinde net olarak belirlemek oldukça zordur. Çünkü koşullar değişkendir ve çevre etkileri malzemeye göre değişir. Yapının stabilitesinin korunması, taşıyıcı

sistemdeki bütün elemanların korunmasıyla mümkün olabilir. İlk başta, betondaki bozulmalara yüksek direnç gösteren çimento çeşidi hesaba katılmadan; betonun doğru karışım oranına ve düşük su-çimento oranına sahip olması ve üretilen betonun iyi derecede sıkıştırılması gibi faktörler göz önüne alınmalıdır. Çimentonun aynı çeşidi için daha mukavemetli beton, daha düşük geçirimli olacağı için kimyasal etkilere karşı daha dirençli olacağı farz edilir (Türkmen vd, 2002).

### **2.3.9.1 Su geçirimsizlik**

Uçucu küllü betonların su geçirimsizliği, katkısız betonlara göre daha azdır. İnce taneli mineral katkıların kullanılması taze betondaki terlemeyi azaltmakta, böylece terleme nedeniyle betonda oluşacak boşluklar azalmaktadır. Ayrıca, mineral katkıların içindeki silika ile çimentonun hidrasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksit reaksiyona girerek C-S-H jelleri oluşturmaktadır. Böylece çimento hamurunun içindeki jel miktarı artmakta, kapiler boşluk oranı azalmaktadır (Erdoğan, 2003).

Hassan vd. (2000), 20 °C’de ve %65 nem ortamında su/bağlayıcı oranını 0.29 alarak, Uçucu kül ikameli yüksek performanslı betonların 28 gün sonundaki porozitelerinde dikkate değer bir azalma olduğunu belirtmektedirler. Normal PÇ’lu betonların permeabilitesinin ise uçucu kül ikameli betonlara göre daha yüksek olduğunu ifade etmektedirler.

Karahan (2006), betona katılan uçucu kül oranı arttıkça boşluk ve su emme oranlarının arttığını belirtmiş; yalnızca %10 uçucu kül ilavesi ile boşluk ve su emme oranlarının kontrol betonuna eşdeğer düzeyde olduğunu bildirmiştir.

Uçucu kül içeren çimentolarla hazırlanan harçların gözenek dağılımı ve ortalama gözenek çapı, uçucu küllü miktarı ve inceliği arttıkça azalmaktadır (Chindaprasirt vd., 2005).

### **2.3.9.2 Sülfatlara dayanıklılık**

Uçucu kül kullanımının betonda geçirgenliği azaltması ayrıca sülfat atağının beton üzerindeki bozucu etkilerini de azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, uçucu kül çimentonun

bir kısmı ile yer değiştirildiğinde toplam  $C_3A$  miktarı azalacağından, oluşacak sülfo alüminatın meydana getireceği zararlı hacim genleşmelerini de azaltmaktadır (Karahan, 2006). Ayrıca, puzolan katkılı betonlardaki hidrasyon, önce Portland çimentosu ile su arasında başlamaktadır. Puzolanların reaksiyon gösterebilmeleri;  $C_3S$  ve  $C_2S$  anabileşenlerinin hidrasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksitin kullanılmasıyla gerçekteşmektedir. Yani puzolan katkılı betonlarda daha az miktarda kalsiyum hidroksit yer almaktadır. Bu da, sülfat ve kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyon sonucunda oluşabilecek alçitaşı miktarının az olmasına neden olmaktadır (Erdoğan, 2003). Buna ek olarak, ilave hidrasyon ürünleri geçirgenliği azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Monteiro ve Kurtis (2003), tarafından yapılan çalışmada, betonun sülfat saldırısından zarar görmemesi için kritik bir bölgenin bulunduğu, çimentonun  $C_3A$  miktarının %8'den az, su-çimento oranının 0.45'in altında olması halinde 40 yıllık maruz kalma süresinde hasar oluşmadığı, çimento yerine %25 ve %45 oranlarında uçucu kül kullanımının genleşmeleri azalttığı belirtilmektedir.

Düşük kalisyum içeren uçucu küllerin Portland çimentosu ile kısmen yer değiştirmesiyle üretilen uçucu küllü betonların sülfatlara karşı dayanıklılığının arttığı gözlenmiştir (Wesche, 1991).

Chindaprasirt vd. (2004) tarafından yapılan bir çalışmada, F sınıfı uçucu kül kullanımının sülfat dayanıklılığını arttırdığı, uçucu kül inceliği arttıka bu etkinin daha belirgin hale geldiği görülmüştür. Kaba uçucu kül (Blaine değerı 1800  $cm^2/gr$ ) kullanımı halinde ise genleşmelerin azalmadığı, aksine arttığı ifade edilmektedir.

### **2.3.9.3 Alkali-agrega reaksiyonu**

Uçucu küllü betonlarda katkısız betondakine göre daha az Portland çimentosu bulunması, betonun içerisinde daha az miktarda  $C_3A$  ve alkalilerin yer almasına, dolayısıyla uçucu küllü betonlarda alkali-agrega reaksiyonunun daha az miktarda gerçekteşmesine sebep olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Blezynski ve Thomas, (1998) uçucu külün, uzun periyotlarda (3 yıldan fazla) alkali tuz çözeltisine maruz betonun, alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşan genleşmeyi azaltmada etkili olduğunu söylemektedirler.

#### **2.3.9.4 Karbonatlaşma**

Karahan (2006), uçucu kül katkılı betonlarda, kontrol betonuna göre daha fazla karbonatlaşma görüldüğünü ve uçucu kül ikame oranı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin de arttığını bildirmiştir.

Atiş (2003), kuru kür ve ıslak kür ortamlarında, %70 uçucu küllü içeren betonun, %50 uçucu küllü içeren betona ve normal PÇ'lu betona göre karbonatlaşma miktarının daha fazla olduğunu belirtmektedir. Yine her iki kür ortamında %50 uçucu küllü içeren betonun normal PÇ'lu betona göre daha az karbonatlaşma yaptığını söylemektedir.

#### **2.3.9.5 Aşınma direnci**

Gebler ve Klieger (1986), kontrol betonunun ve uçucu küllü betonların aşınma dayanımlarının basınç dayanımlarına bağlı olduğunu söylemişlerdir. Atiş (2000), yüksek oranda uçucu kül kullanımı ile elde edilen betonun aşınmaya karşı direncini incelemiştir. Beton basınç dayanımı arttıkça aşınma direncinin de arttığını görmüştür. Çok yüksek beton basınç dayanımlarında, yüksek oranda uçucu kül kullanımı (Çimento ağırlığının %70'i ile yer değişim) ile üretilen betonun aşınma direnci şahit betonun aşınma direncinden daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir.

#### **2.3.9.6 Donma-çözülme**

Uçucu küllü betonların donmaya karşı dayanımı konusunda net ve kesin sonuçlar elde edilememiş, bu da deney şartlarına ve kür süresinin farklılığına bağlanmış olmakla beraber, uçucu küllü betonların normal betonlardan daha fazla kür süresine ihtiyaç duydukları tespit edilmiştir. Aksi takdirde, uçucu külün betonun dona dayanıklılığını olumsuz etkilediği düşünülmektedir (Ünal ve Uygunoğlu, 2004).

## 2.4 Kalsit

Kalsit bir mineral adı olup karbonatlı kayaları oluşturan bu mineralin kimyasal yapısı  $\text{CaCO}_3$  dır. Çeşitli şekillerde kristal halde bulunan camsı parlaklıkta, renksiz saydam yapıdadır. Kolay öğütülür ve öğütme sonrası rengi beyazdır. Kalsitin sertliği Moh's skalaya göre 3, yoğunluğu ise, 2.6-2.7 civarındadır. Mikronize boyutlarda öğütüldükten sonra boya, kağıt,dolgu, gübre,plastik, vb. birçok sektörde beyazlık, aşındırıcılık ve aşınmaya karşı direnç kazandırma özellikleri nedeniyle mümkün olduğu kadar fazla kullanılan bir dolgu maddesidir. Kalsit, temel birçok sanayinin ana girdisi olmakta, titanyum dioksit gibi çok pahalı pigmentlerin daha az kullanılmasını sağladığı için, gerek ekonomik gerekse çevre sağlığı açısından kullanımı yaygın bir maddedir (Akın, 2009).

Öğütülmüş kalsiyum karbonat (GCC) endüstriyel mineral olarak çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu mineralin kullanımı sırasında kalitesini tanımlayan üç niteliği vardır. Bunlar tane çapı, renk ve kimyasal saflığıdır. Bu özellikler mineralin herhangi bir uygulamadaki uygunluğunu tariflenmektedir. Kalker taşının renkleri parlak bir beyazdan açık griye kadar yayılmakta ve kalsiyum karbonat içeriği ise %80-99.9 arasında değişmektedir. Kalsit, reel anlamda ise epoksi terrazzo yer döşeme kaplamasında, dolgu malzemesi göreviyle kullanılmaktadır. 250µm kalınlığındaki kalsitin, 40 litrelik bir epoksi terrazzo karışım harcında 1:10 oranında yani 4 lt kullanılması, gerek maliyet gerek imalat kolaylığı anlamında ciddi avantajlar sağlamaktadır (Akın, 2009).

### 2.4.1 Dünya ve Türkiye'de kalsit

Türkiye kalsitleri kalitesi ve rezervleri bakımından çok zengindir. Yabancı kuruluşlar yatırımlara ve araştırmalara başlamıştır. 1980'lerde 2-3 olan üretici sayısı günümüzde 13 biri yabancı olmak üzere 20'ye yaklaşmıştır. Türkiye kalsit tüketimi ise 1980'li yıllarda 20-30.000 ton/yıl'dan 2000'lere gelindiğinde 300.000 t/yıl'a yaklaşmıştır ve hızla artmaktadır. Kalsit çevreye en az zarar veren mineraldir. Birçok yabancı ülkede toprağa zenginleştirmek için karıştırılmakta ve kirlenen göllerin asiditesini düşürmek için kullanılmaktadır (Kaymak, 2010).

Çanakkale Karabiga Bölgesi, Türkiye’de mevcut en iri kristalli kalsit oluşumlarından biridir. Granit kantağında oluşan kalsit yatakları yüksek beyazlıktadır ve öğütülmesi kolaydır, fakat Ege Bölgesi ve Niğde’de bulunan oluşumlara göre beyazlığı daha düşüktür. Bayramiç, Biga, Ezine’de mermer yatakları bulunmaktadır. Balıkesir Erdek ve Manyas’da çok zengin iri kristalli mermer yatakları ve ocakları bulunmaktadır. Trakya’da Yıldız dağları, Bursa Orhaneli’nde mermer ve dolomitik mermer yatakları bulunmaktadır. Bursa Orhangazi, Keles, İnegöl zengin mermer yataklarına sahiptir, fakat üretim çok küçük çapta yapılmaktadır (Sprung and Siebel, 1991).

Niğde Bölgesinde son 10 yıl içerisinde çok hızlı üretim artışı yapan kalsit ocakları bulunmaktadır ve çok zengin rezerve sahiptir Türkiye’deki en beyaz oluşumlardır (Kaymak, 2010).

## **2.4.2 Kalsitin kullanım alanları**

### **2.4.2.1 Kağıt sektörü**

Mikronize kalsit özellikle yazı kağıtları, duvar kağıtları ve kartonların üretiminde selüloza %15-30 oranlarında katılarak kullanılmaktadır. Yüksek beyazlıkta olması, ucuzluğu ve kağıda kazandırdığı diğer teknik özelliklerden dolayı son 10 yıl içerisinde Avrupa’dan başlayıp tüm dünyada kaolinin yerini alarak kağıt sektörüne girmiştir.

Kaolinin dolguda kullanıldığı asit sistemiyle üretim yapan kağıt sektörü son 10-15 yıl içerisinde artan bir ivmeyle nötr tutkallama veya alkali sistem diye tanımlanan yöntemeye dönmüştür. Üretilen kağıtlarda böylece zaman içerisinde sararma önlenmiş ve kaoline göre daha fazla asit dolgusu girme imkanı olmuştur. Bu da daha az selüloz tüketimi, daha az optik beyazlatıcı kullanımı demektir. Böylece kalsit kullanımı çevreye ciddi katkılarda bulunmuştur.

### **2.4.2.2 Boya sektörü**

Boya sektöründe 1-40 mikron boyutları arasında kuru öğütülmüş kalsit kullanılmaktadır. En yaygın kalsit kullanım boyutu 5 mikrondur. İnşaat boyalarında iç

ve dış kaplamada su bazlı boya sisteminde %25-30 oranında kalsit, boya içerisinde kullanılmaktadır (Kaymak, 2010).

#### **2.4.2.3 Plastik sektörü**

Kalsit; plastik mobilya, boru, otomotiv ve yan sanayi gibi bir çok plastikten mamul ürün üretiminde gerek doğal öğütülmüş, gerekse kaplanmış halde kullanılmaktadır. Kaplama çoğunlukla stearik asitle bazen de kalsiyumstearat ile yapılmaktadır. Plastik sektöründe başta kalsit olmak üzere benzeri dolgu maddelerinin kullanımı her yıl giderek artmıştır. Rengi, kimyasal saflığı, ucuzluğu ve bir çok nedenlerle kalsit dolgu olarak kullanılmaktadır (Kaymak, 2010).

#### **2.4.2.4 İnşaat sektörü**

Türkiye’de yeni gelişmekte olan hazır sıva, macun gibi maddelerde beyaz dolgu kullanılması, Avrupa’da ve ABD’de çok yaygındır. İnşaat sektöründe beyaz renkli, çimento esaslı sıva ve macunlar toz polimerlerle karıştırılıp duvara uygulandığında kaba sıva, macun ve hatta boya işlemi bir uygulamada çözülmektedir. Yakın gelecekte çeşitli boyutlarda öğütülmüş kalsit alçı, çimento, toz polimer bağlayıcılarla karıştırılıp inşaat sektöründe yoğun olarak kullanılmaya başlayacaktır. Bu sektör tonaj olarak en büyük oranda kalsit tüketimi alanı oluşturacak bir sektördür. Kalsit seramik sektöründe düşük oranlarda olsa da 40-100 mikron boyutlarında öğütüldükten sonra reçetelere katılmaktadır.

## BÖLÜM III

### MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri ile beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları, numune boyutları ve bu numuneler üzerinde yürütülen deneyler hakkında bilgi verilmektedir.

#### 3.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri

Beton üretiminde özellikleri aşağıda verilen çimento, uçucu kül, mikronize kalsit, agrega, su ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

##### 3.1.1 Çimento

Bu çalışmada, Niğde ÇİMSA Çimento Fabrikası tarafından üretilen, TS EN 197-1 (2012) ile uyumlu CEM II/ A-M (P-L) 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun taze olarak kullanılmasına özen gösterilmiş ve nem almayacak şekilde koruyucu kaplarda korunmuştur. Kullanılan çimentoya ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1’de, fiziksel özellikler ise Çizelge 3.2’de verilmiştir. Bu değerler ÇİMSA Niğde Çimento Fabrikasından alınmıştır.

**Çizelge 3.1.** Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal analiz	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Cl	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	K.K
Analiz sonuçları (%)	20.33	5.35	3.15	62.11	1.50	0.02	3.30	0.65	0.95	2.51

**Çizelge 3.2.** Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri

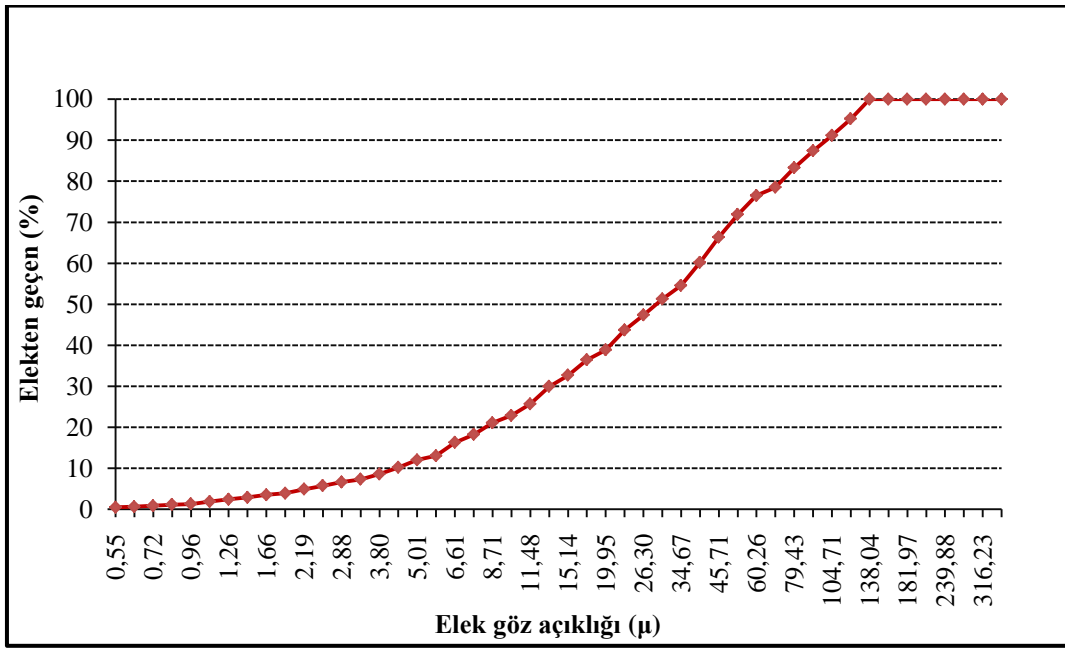
Fiziksel Özellikler		
Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	3.12	
İncelik	Özgül Yüzey(cm <sup>2</sup> /gr)	3495
	0.040 mm elek kalıntısı(%)	12.15
	0.090 mm elek kalıntısı(%)	0.85
Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) 7 günlük	39.02	
Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) 28 günlük	46.71	

### 3.1.2 Uçucu kül

Çalışmada kullanılan uçucu kül Yumurtalık Sugözü Termik Santralinden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te, granülometri eğrisi ise Şekil 3.1'de verilmiştir. Kullanılan uçucu külün özgül ağırlığı 2,39 gr/cm<sup>3</sup> olup özgül yüzeyi 4052 cm<sup>2</sup>/gr'dır. Ayrıca uçucu külün 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksi sırasıyla %69 ve %75'tir.

Çizelge 3.3. Uçucu külün kimyasal özellikleri

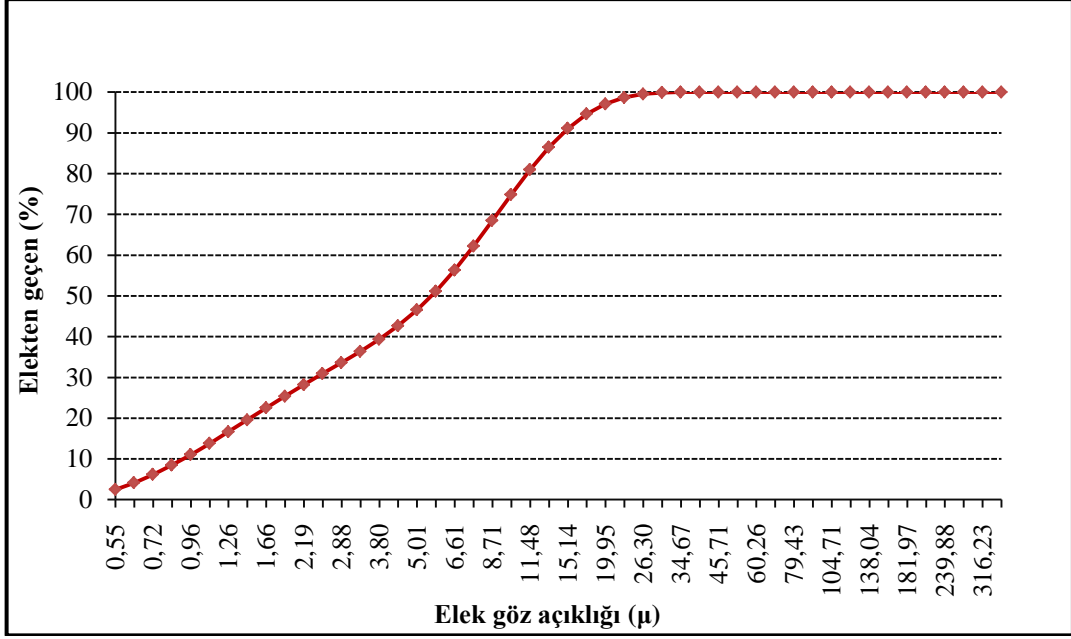
Kimyasal analiz	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	K.K
Analiz sonuçları (%)	56.14	26.05	6.91	3.32	1,33	1,38	2,9	1,69



Şekil 3.1. Uçucu külün granülometri eğrisi

### 3.1.3 Mikronize kalsit

Çalışma kapsamında, Niğde ilinde faaliyet gösteren NİĞTAŞ Mikronize Kalsit San. Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen mikronize kalsit kullanılmıştır. Kullanılan kalsitin granülometri eğrisi Şekil 3.2'de verilmiştir. Kullanılan kalsitin özgül ağırlığı 2.60 gr/cm<sup>3</sup> olup özgül yüzeyi 2430 cm<sup>2</sup>/gr'dır.



Şekil 3.2. Mikronize kalsitin granülometri eğrisi

### 3.1.4 Agregat

Deneysel çalışmalarda, 12-22, 5-12, 0-5 ve 0-1 mm olmak üzere dört grup agregat kullanılmıştır. 12-22, 5-12 ve 0-5 mm agregat Niğde ili Bor ilçesi Pınarbaşı bölgesinden temin edilen kırma bazalt agregatdır. 0-1 mm agregat ise Niğde ili Bor ilçesi Çömlekçi bölgesinden elde edilen doğal agregatdır. Agregatın su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı TS EN 1097-6'ya (2002) göre tespit edilmiş olup Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4. Deneysel çalışmada kullanılan agregatların fiziksel özellikleri

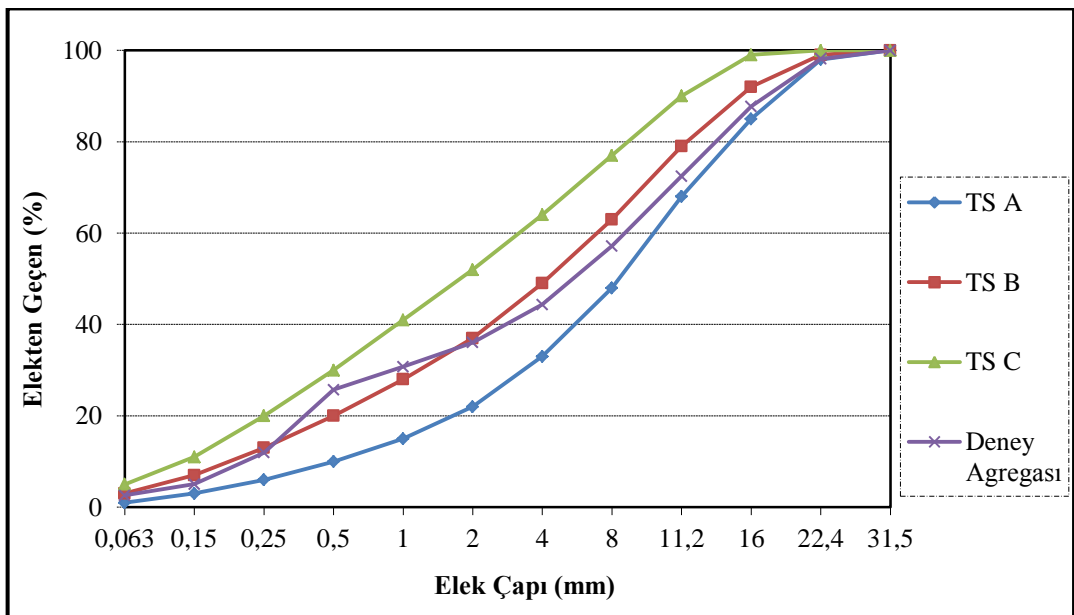
Fiziksel özellik	İnce agregat		Kaba agregat	
	0-1	0-5	5-12	12-22
Özgül ağırlık (DYK)	2.52	2.53	2.69	2.71
Su emme yüzdesi (%)	2.2	3.6	1.7	1.4
Toplam nem içeriği (%)	1.95	2.1	0.6	0.3

Deneysel çalışmada kullanılan agregatlar TS 802'de (2009) agregat en büyük dane büyüklüğü 16.0 mm olan beton için belirtilen agregat dane büyüklüğü dağılımı eğrisine ait sınırlar içerisinde kalacak şekilde ağırlıkça 0-1 doğal kumdan % 21, 0-5 kırma kumdan % 27, 5-12 iri agregatdan % 25 ve 12-22 iri agregatdan % 27 oranlarında

karıştırılmıştır. Karışımın elek analizi sonuçları Çizelge 3.5’de, granülometri eğrisi Şekil 3.3’te verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Kullanılan agreganın granülometrisi

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)			Kullanılan Agrega
	TS 706 EN 12620 + A1 Alt Limit	TS 706 EN 12620 + A1 Orta Limit	TS 706 EN 12620 + A1 Üst Limit	
31,5	100	100	100	100
22,4	98	99	100	98,12
16	85	92	99	87,75
11,2	68	79	90	72,45
8	48	63	77	57,17
4	33	49	64	44,35
2	22	37	52	36,05
1	15	28	41	30,78
0,5	10	20	30	25,73
0,25	6	13	20	11,97
0,125	3	7	11	5,05
0,63	1	3	5	2,58



**Şekil 3.3.** Kullanılan agreganın granülometri eğrisi

### **3.1.5 Kimyasal katkı malzemesi**

Karışımlarda işlenebilirliği sağlamak amacıyla TS EN 934-2'ye (2005) uygun süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı ligno sülfanat esaslı olup yüksek oranda su azaltan, yoğunluğu  $1.185 \pm 0.01$  kg/litre arasında değişkenlik gösteren, kahve renkli bir katkıdır.

### **3.1.6 Karışım ve bakım suyu**

Su betonun içerisinde iki önemli görev üstlenmektedir. Bunlardan birincisi; çimento ile birleşerek hidrasyonun (çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların) yer almasını sağlamak, ikincisi ise, betonun karılma işleminde agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak taze beton karışımında istenilen işlenebilmeyi sağlamaktır.

Ayrıca kür suyu olarak, yerine yerleştirilmiş olan betonun yüzeyini ıslak tutup içerisindeki suyun buharlaşmasını önlemek, böylece, betonun içerisinde kimyasal reaksiyonların gelişebilmesi için yeterli miktarda suyun bulunmasını sağlamak gibi bir görevi daha vardır. Beton üretiminde kullanılacak karışım suyunun kalitesi ve miktarı betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Kür suyunun kalitesi, beton karışımında yer alacak suyun kalitesi kadar önemli olmasa da, kür suyu olarak kullanılacak suyun içinde de betonda zararlı kimyasal olaylara yol açacak veya betonun yüzeyinin lekelenmesine neden olabilecek yabancı maddelerin yer almaması gerekmektedir (Erdoğan, 2003).

Deneylerde kullanılan karışım ve bakım suyu Niğde Merkez İlçesi Hamamlı bölgesinde açılmış sondaj kuyusuna aittir. TS-1008 (2003) standardına göre analizi yaptırılan suyun parametreleri beton karma suyu limitlerine uygundur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.6'da belirtildiği gibidir.

**Çizelge 3.6.** Kullanılan karma ve kür suyunun analiz sonuçları

Fiziksel ve kimyasal özellikler	
pH (25 C°)	7.35±0.03
Sülfat (mg/l)	12.13
Klorür (mg/l)	4,75
Fosfat, (mg/l)	0.015
Alkaliler(Na <sub>2</sub> O), (mg/l)	4,51
Nitrat, (mg/l)	2,74

### 3.2 Beton Karışım Oranları

Beton karışım hesabı TS 802'de (2009) belirtilen mutlak hacim metoduna göre yapılmıştır. Karışımlarda kullanılan su-bağlayıcı (s/b) oranı 0.63'tür. Bağlayıcı olarak çimentodan başka uçucu kül ve mikro kalsit katkısı kullanılmış olup, uçucu kül ve mikro kalsit katkısının şahit betonda bulunan çimento ile ağırlıkça %5, %10, ve %20 oranlarında yer değiştirilmesiyle elde edilmiştir. Böylece şahit numuneyle birlikte toplam 7 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlar, su-bağlayıcı (s/b) oranı ve kimyasal katkı miktarı bağlayıcının ağırlıkça %1'sabit tutularak hazırlanmıştır. Bir metreküp beton numune içinde bulunan malzeme miktarları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

**Çizelge 3.7.** Bir metreküp betonu oluşturan malzeme miktarları (Kg)

Karışım Kodu	Çimento	UÇ	KA	Su	İnce(0-1) Agrega	İnce(0-5) Agrega	İri(5-12) Agrega	İri(12-22) Agrega
Şahit	300	0	0	190	382	485	452	487
10U	270	30	0	190	381	483	450	485
10K	270	0	30	190	382	483	450	486
5U5K	270	15	15	190	381	483	450	486
20U	240	60	0	190	380	478	450	483
20K	240	0	60	190	381	481	450	485
10U10K	240	30	30	190	380	481	450	483

### 3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Beton üretiminde, Fotoğraf 3.1’de görüldüğü 150 lt kapasiteli pan tipi beton mikseri kullanılmıştır. Beton karma suyunda kayıp oluşmaması için beton mikseri su ile nemlendirdikten sonra, kaba agrega ve ince agrega konularak karışım homojen hale gelinceye kadar mikser çalıştırılmıştır. Ardından çimento ve diğer bağlayıcılar ilave edilerek karıştırmaya devam edilmiştir. Son olarak da karma suyu ve süper akışkanlaştırıcı karışıma mikser çalışır haldeyken ilave edilmiştir.



**Fotoğraf 3.1.** Taze betonun hazırlanması

TS EN 206-1 A1’e (2005) uygun olarak hazırlanan beton numuneleri Fotoğraf 3.2’de görüldüğü gibi 10x10x10 cm’lik küp kalıplara yerleştirilmiştir. Yaş birim ağırlıkları ölçülen numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkartılmış ve  $20\pm 2$  °C sıcaklıktaki kür havuzuna konularak basınç deneyi yapılacak zamana kadar bakım uygulanmıştır.



**Fotoğraf 3.2.** Taze betonların kalıplara yerleştirilmiş hali

Basınç dayanımı ve ultra ses geçiş hızı deneylerini gerçekleştirmek, betonların 1., 3., 7., 28., 90., ve 180.gün yaşlarında işlem yapmak için her bir karışımdan 18 adet olmak üzere toplam 126 adet numune hazırlanmıştır.

### **3.4 Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneysel Çalışmalar**

#### **3.4.1 Çökme (Slamp) deneyi**

Fotoğraf 3.3’de görüldüğü gibi hazırlanan karışımlar TS EN 12350-2 (2010)’e uygun şekilde çökme deneyine tabii tutulmuştur.



**Fotoğraf 3.3.** Çökme deneyi

#### **3.4.2 Yayılma tablası deneyi**

Hazırlanan karışımlar, bir diğer kıvam deneyi olan yayılma tablası deneyine tabi tutulmuştur. TS EN 12350-5 (2010)'e uygun şekilde Fotoğraf 3.4'de görülen deney ekipmanı kullanılarak, yayılma tablasında betonun hem eninin hem de boyunun uzunluğunu saptanıp ortalaması alınarak kayıt edilmiştir.



**Fotoğraf 3.4.** Yayılma tablası deneyi

### 3.4.3 Hava muhtevasının tayini deneyi

TS EN 12350-7 (2010) referans alınarak yapılan bu deneyde, hazırlanan taze beton şişlenerek sıkıştırılmak suretiyle hacmi en az 2 dm<sup>3</sup> olan, Fotoğraf 3.5’de görülen ölçüm kabı içine alınır. Yüzeyi düzlenerek fazlası alınır ve üst kısım kelepçelenerek ölçüm kabına takılır. Seviye göstergesindeki sıfır değerine kadar su eklenir. Hava ölçer betondaki tüm hava üste çıkana kadar ters çevrilir ve sarsılır. Sonuçta hava miktarını belirlemek için seviye göstergesinden eksilen sıvı miktarı okunur.



**Fotoğraf 3.5.** Betonda hava muhtevası ölçmesi için kullanılan deney aleti

### 3.4.4 Basınç dayanımı

10x10x10 cm boyutlu beton numuneler, TS EN 12390-3’e (2010) uygun olarak 1., 3., 7., 28., 90., 180. günlerde tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler, Fotoğraf 3.6’da görülen 3000 KN kapasiteli basınç aletinde 0.6 MPa/sn yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir.



**Fotoğraf 3.6.** Basınç dayanım test cihazı

Numunelerin basınç dayanımları (3.1) eşitliği yardımıyla bulunmuştur.

$$f_{cc} = P / A_c \quad (3.1)$$

Burada:

$f_{cc}$  : Basınç dayanımı

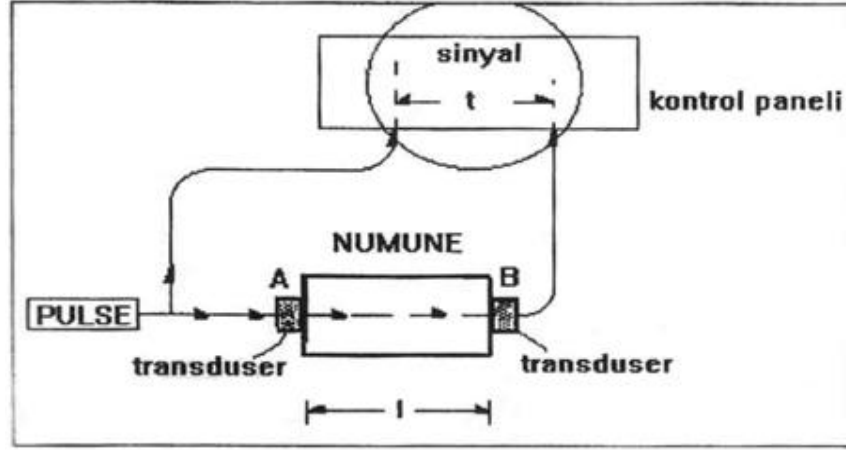
$P$  : Preste kırılma anında okunan en büyük yük

$A_c$  : Numunenin basınç yükü uygulanan kesit alanı

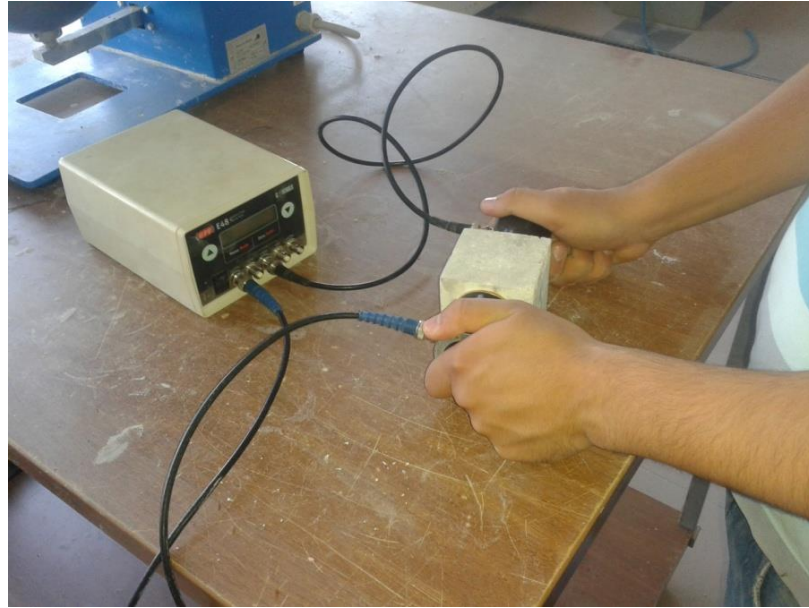
### 3.4.5 Ultrases geçiş hızının belirlenmesi

ASTM C 597 (2009)'ye uygun 0,1  $\mu$ s duyarlıklı ultrases aleti ile  $t_p$   $\mu$ s ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Ses geçiş sürelerinin ölçülmesinde numune yüzeyindeki pürüzlerin oluşturduğu boşlukları doldurmak amacı ile numunelerin alt ve üst yüzeylerine ultrason jeli sürülmüş 55 kHz'lik ses dalgaları gönderen ve alan iki transduser Şekil 3.4 ve Fotoğraf 3.7'de görüldüğü gibi numunenin düzgün yüzeylerine yerleştirilmiş, direkt iletim yöntemi uygulanarak ses geçiş süresi ( $t_p$ ,  $\mu$ s) okunmuştur. Problar yer

değiştirilerek ikinci okuma alınmış, her numune için bu iki okumanın ortalaması alınıp  $V_s = L/t$  yararlanarak ses geçiş hızı ( $V_s$ , km/saat) hesaplanmıştır.



Şekil 3.4. Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi



Fotoğraf 3.7. Numunelerin ultrases geçiş hızının belirlenmesi

### 3.4.6 Çabuk donma ve çözülme koşulları altında betonda dayanıklılık tayini deneyi

Hazırlanan numunelerin 28 günlük standart kür süresi tamamlanınca, kür havuzunda saklanan numuneler çıkarılarak donma ve çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Deney yapılırken TS 3449'da belirtilen esaslara uyulmuş ve havada donma, suda çözülme metodu uygulanmıştır. TS 3449 (2005)'da belirtilen donma-çözülme sürelerine uygun

olarak, hazırlanan numuneler 90 dakika havada  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de donma, 30 dakika  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki suda çözülme sonunda bir çevrim olarak tanımlanmıştır. Numunenin, donma sıcaklığından, çözülme sıcaklığına geçişi 50 dakikada tamamlanmıştır. Bu donma çözülme çevrimi 150 kez tekrarlanmıştır. Donma-çözülme deneyine başlamadan numunelerin ağırlıkları ve ultrasonik hız değerleri tespit edilmiş 50., 100. ve 150. çevrimlerden sonra ağırlık ve ultrasonik hız değerleri tekrar ölçülmüştür. 150. çevrim sonunda ise numunelerin basınç dayanımları saptanmıştır.



**Fotoğraf 3.8.** Donma çözülmeye maruz kalmış beton numuneler

### 3.4.7 Aşınma dayanımının tayini deneyi

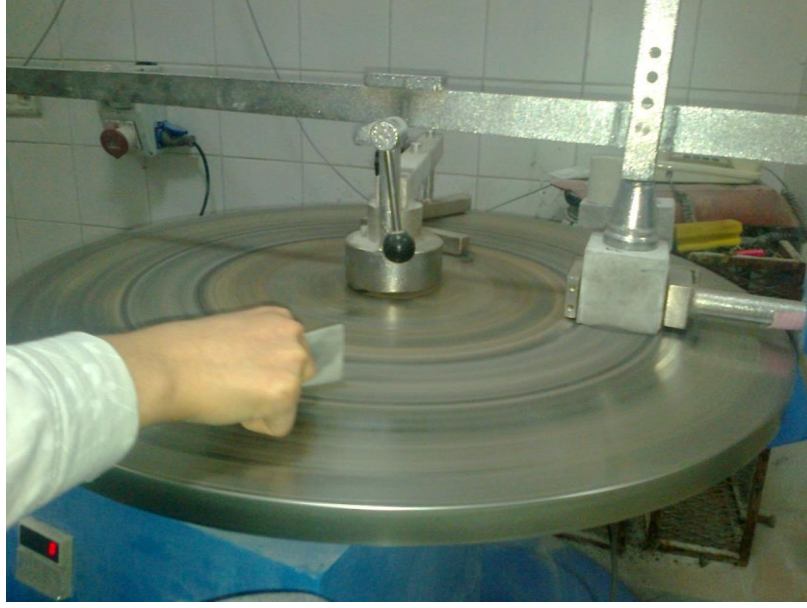
Beton numunelerinin aşınma direncinin belirlenmesinde Böhme yüzey aşınma yöntemi kullanılmıştır. Böhme aşınma deneyi, Fotoğraf 3.9'da görülen deney aleti kullanılarak, TS 2824 EN 1338 (2005), standardına uygun şekilde  $71\times 71\times 71$  mm ebatlarında küp numuneler üzerinde 28. ve 90. günlerde yapılmıştır. Böhme yüzey aşınma deneyi her bir beton yaşı için 3 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler deney zamanına kadar  $20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  kür havuzunda korunmuştur. Beton küp numunelerinin deney sonrasındaki aşınma miktarını belirlemek amacıyla deney öncesi ve sonrasında ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Aşınma değerleri (3.2) eşitliği yardımıyla ağırlıkça bulunmuştur.

$$\Delta_M = \frac{M_{ilk} - M_{son}}{M_{ilk}} \times 100 \quad (3.2)$$

$\Delta_M$  : Toplam kütle kaybı (%)

$M_{ilk}$  : Deneye başlamadan önceki kütle (gr)

$M_{son}$  : Deney sonrası kütle (gr)



**Fotoğraf 3.9.** Betonda aşınma deneyi

### **3.4.8 Basınç altında su işleme derinliğinin tayini deneyi**

Basıncılı su geçirimsizlik deneyi Fotoğraf 3.10'da gösterilmekte olan deney aleti ile TS EN 12390-8 (2002)'e uygun olarak yapılmıştır. Su içerisinde kür uygulanmış sertleşmiş beton numunesi üzerinde, basınç altında su işleme derinliği belirlenmiştir. Basıncılı su, 150 x 150 x 150 mm ebatlarındaki 28 ve 90 günlük standart kür süresi tamamlanmış sertleşmiş beton yüzeyine uygulanmış, daha sonra numune, yarma deneyine tabi tutularak numune ortasından yarıp su işleme derinliği, alın kısmından ölçülmek suretiyle belirlenmiştir. Deney her bir beton yaşı için 3 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.



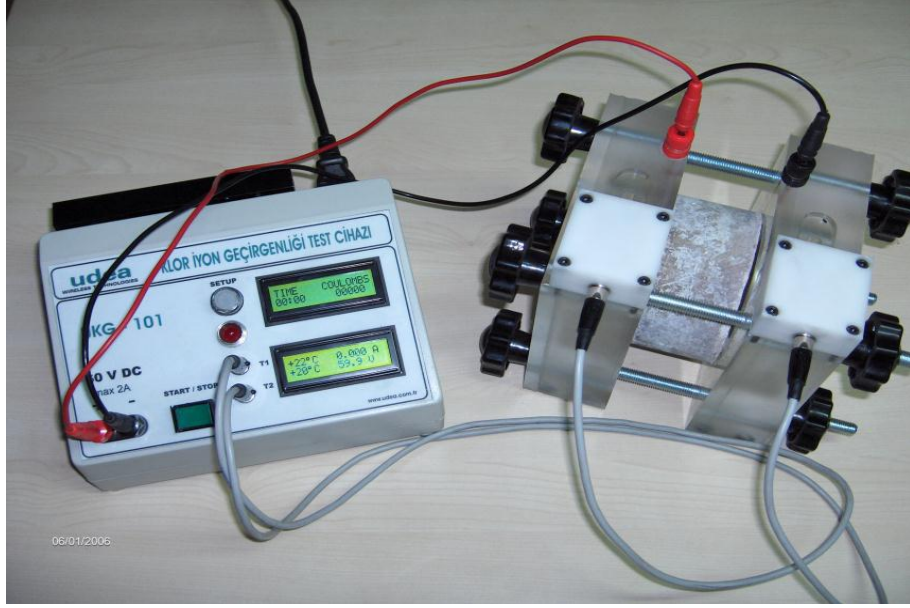
**Fotoğraf 3.10.** Betonda basınç altında su işleme derinliği

#### **3.4.9 Beton için hızlandırılmış klor iyon geçirgenliği tayini deneyi**

102 mm çapında, 51 mm uzunluğunda uçlarından kesilmiş 28 ve 90 günlük standart kür uygulanmış beton, ASTM C 1202 (2005)'e uygun şekilde hazırlanıp, deneye tabi tutulmuştur. Fotoğraf 3.11'de görüldüğü gibi, saf su ile hazırlanmış kütlece %3 NaCl çözeltisi bir hazneye, diğer hazneye de yine saf su ile hazırlanmış kütlece %3 NaOH çözeltisi eklenerek deney başlatılmıştır. 360 dakika süren deney sonunda hazneler arası iyon geçişi okunarak deney sonuçlandırılmıştır. Deney cihazının ekranından okunan yük miktarına göre beton malzemenin geçirgenlik sınıfı Çizelge 3.8'de verilmiştir. Deney her bir beton yaşı için 3 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.8.** ASTM C 1202'e göre geçirgenlik sınıfları

<b>YÜK</b>	<b>GEÇİRGENLİK SINIFI</b>
>4000	YÜKSEK
4000-2000	ORTA
2000-1000	DÜŞÜK
1000-10	ÇOK DÜŞÜK
<100	İHMAL EDİLEBİLİR



**Fotoğraf 3.11.** Hızlandırılmış klor iyon geçirgenliği deney aleti

## BÖLÜM IV

### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 4.1 Çökme (Slamp) Deneyi

Yürütülen bu tez çalışması kapsamında, her karışım için taze beton üzerinde mineral katkıların işlenebilirlik üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla çökme deneyi yapılmıştır. Her karışım için beton taze haldeyken çökme deney aleti kullanarak kıvamları ölçülmüş ve cm cinsinden yuvarlatılarak kaydedilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Karışımlara ait çökme değerleri (cm)

Karışım	Şahit	10U	10K	5U5K	20U	20K	10U10K
Çökme	18	16	18	18	16	17	18

Çizelge 4.1’de her bir karışım için ölçülen çökme değerleri verilmiştir. Çizelge 4.1 incelendiği zaman, tüm karışımlarda çökme değerinin 16 ile 18 cm arasında değiştiği görülmüştür. Çizelge 4.1’den görüldüğü üzere, mineral katkının betonun çökme değerleri üzerinde fazla bir etkisi olmamıştır. Akkaya ve Kesler, (2012) yaptıkları çalışmada benzer bir durumdan bahsetmişlerdir.

#### 4.2 Yayılma Tablası Deneyi

Betonun kıvamı, işlenebilirliği betonun karakteristik özellikleri kadar büyük önem taşımaktadır. Çok iyi tasarlanmış betonlar dahi işlenebilirlik göz önünde bulundurularak dizayn edilmemişse, kalıba yerleştirilme esnasında ciddi problemler doğmakta ve çoğu zaman sık donatıların arasından geçemediğinden, büyük boşlukların oluşmasına sebep olmaktadır (Koç, 2012).

**Çizelge 4.2.** Karışımlara ait yayılma tablası deney sonuçları (cm)

Karışım	Şahit	10U	10K	5U5K	20U	20K	10U10K
Yayılma	55	53	55	56	53	55	56

Yayılma tablası deney metodu da betonun kıvam tayini seçeneklerinden biridir. Çizelge 4.2’de her karışıma ait yayılma tablası deney sonuçları sunulmaktadır. Çizelge 4.2 incelendiğinde, yayılma değerlerinin 53 ile 56 cm arasında değiştiği gözlenmiştir. Mineral katkı maddelerinin betonun yayılma değerine fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yayılma tablası deney sonuçları ile çökme deneyi sonuçlarının birbirlerine benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

### 4.3 Hava Muhtevasının Tayini Deneyi

Beton içerisindeki hava miktarı beton mukavemetini doğrudan etkileyen bir durumdur. Hava miktarı ne kadar fazla olursa beton mukavemeti ters orantılı olarak düşmektedir.

**Çizelge 4.3.** Karışımlara ait hava muhtevası değerleri (%)

Karışım	Şahit	10U	10K	5U5K	20U	20K	10U10K
Hava muhtevası	1,8	1,6	1,6	1,7	1,5	1,5	1,5

Yürütülen bu tez çalışması kapsamında üretilen karışımlara ait hava miktarları ölçülüp değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir. Çizelge 4.3 incelendiğinde, karışımların hava muhtevaları % 1,5 ile %1,8 arasında değiştiği gözlenmiştir. Çökme ve yayılma tablası deney sonuçlarına benzer olarak mineral katkılar betonun hava muhtevasına da çok fazla etki göstermemiştir.

### 4.4 Basınç Dayanımı Değerleri

Deneysel çalışma kapsamında üretilen 7 farklı karışıma ait 1, 3, 7, 28, 90 ve 180 günlük küp numunelere ait basınç dayanımı değerleri toplu olarak Çizelge 4.4’te verilmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de ise sırasıyla %10 ve %20 ikame oranları için basınç dayanımı grafikleri verilmiştir.

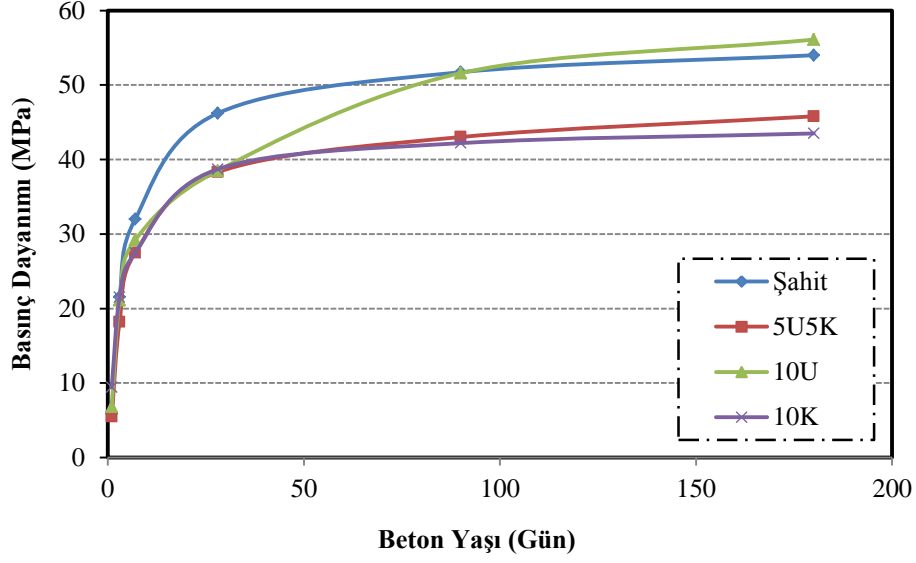
Çizelge 4.4 incelendiğinde tüm karışımlar için numunelerin basınç dayanımlarının zamana bağlı olarak arttığı görülmektedir. 28 günlük basınç dayanım değerleri incelendiğinde en yüksek basınç dayanımının Şahit numuneye ait olduğu görülmektedir. Ancak ilerleyen yaşlarda uçucu kül puzolanik etkisini göstererek 10U karışımı 180.

günde diğer karışımlara kıyasla en yüksek basınç dayanımı değerine ulaşmıştır. Karışımlarda CEM II çimentosu kullanılmasının, %20 Uçucu Kül ikamesine sahip 20U karışımının basınç dayanımı değerinin Şahit numunenin basınç dayanımı değerinden daha düşük olmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Kalsit katkısının beton dayanımına ilk günlerde olumlu etkisinin olduğu görülmüş, 1. günde kalsit katkılı betonlar en yüksek dayanımı göstermiştir. Bu durum literatür ile uyumludur(Akkaya ve Kesler, 2012). İlerleyen yaşlarda kalsitin dayanıma katkısı azalmış 28. güne kadar Uçucu Kül katkılı karışımların basınç mukavemet değerleri ile benzerlik göstermiştir. Ancak 90. ve 180. günlerde dayanım değerleri Uçucu Kül katkılı karışımların dayanım değerlerinden daha düşük olmuştur. Bunun sebebinin, Kalsitin puzolanik özelliğinin olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Aydın ve Yıldırım, 2012).

**Çizelge 4.4.** Karışımlara ait betonların basınç dayanımları (MPa)

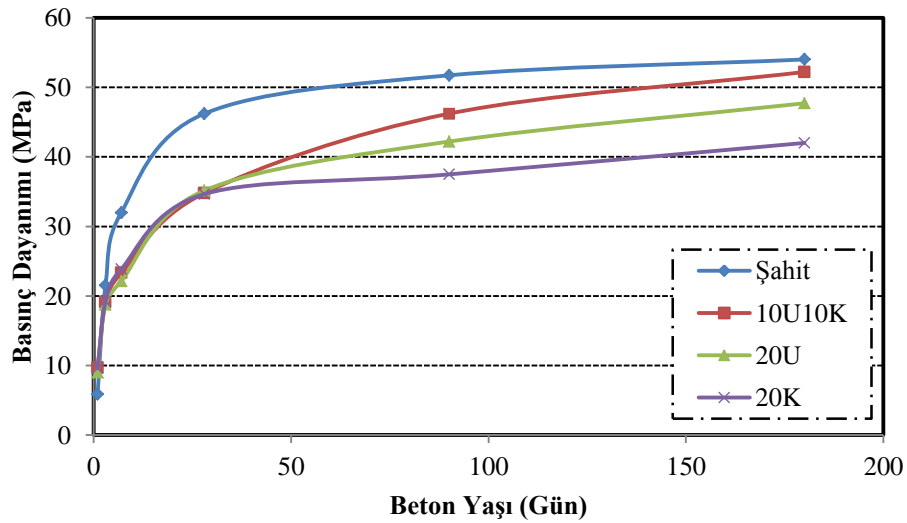
<b>Karışım</b>	<b>1.Gün</b>	<b>3.Gün</b>	<b>7.Gün</b>	<b>28.Gün</b>	<b>90.Gün</b>	<b>180.Gün</b>
Şahit	5,9	21,5	32,0	46,2	51,7	54,0
10U	6,8	21,1	29,2	38,5	51,6	56,1
10K	9,4	21,5	27,5	38,7	42,2	43,5
5U5K	5,5	18,2	27,5	38,3	43,0	45,8
20U	9,0	18,8	22,2	35,2	42,2	47,7
20K	9,6	19,2	23,9	34,6	37,5	42,0
10U10K	9,7	19,1	23,3	34,7	46,2	52,2

Şekil 4.1’de Şahit karışım ve toplam %10 ikame edilmiş karışımların basınç dayanımları sunulmuştur. Şekil 4.1 incelendiğinde 28. Günde en yüksek basınç dayanımı değerinin 46.2 MPa olarak Şahit karışıma ait olduğu görülmektedir. 10U, 10K ve 5U5K karışımlarına ait basınç dayanımı değerleri sırasıyla 38.5, 38.7 ve 38.3 MPa olup, değerler hemen hemen aynıdır. 90. günden itibaren 10U karışımının basınç mukavemeti artmaya başlamış ve 180. günde diğer karışımlardan daha yüksek bir değere ulaşmıştır. 180. günde en düşük dayanım 10K karışımında görülmüştür. 5U5K karışımı ise Uçucu Külün etkisi ile 10K karışımının dayanım değerinden biraz daha yüksek olmuştur.



**Şekil 4.1.** Toplam %10 ikameli karışımlara ait betonların basınç dayanımı

Şekil 4.2’de Şahit karışım ve toplam %20 ikame edilmiş karışımların basınç dayanımları sunulmuştur. Şekil 4.2 incelendiğinde 28. Günde en yüksek basınç dayanımı değerinin 46.2 MPa olarak Şahit karışıma ait olduğu görülmektedir. 20U, 20K ve 10U10K karışımlarına ait basınç dayanımı değerleri sırasıyla 35.2, 34.6 ve 34.8 MPa olup, değerler hemen hemen aynıdır. İlerleyen yaşlarda toplam %20 ikame miktarına sahip karışımların hiçbiri Şahit karışımın basınç dayanımı değerini geçememiştir. Ancak 10U10K karışımı 180. günde Şahit karışımın basınç dayanımı değerine oldukça yaklaşmıştır. Toplam %10 ikame miktarına sahip karışımlara benzer şekilde en düşük dayanım yine tamamen Kalsit katkılı karışımda gözlenmiştir.



**Şekil 4.2.** Toplam %20 ikameli karışımlara ait betonların basınç dayanımı

#### 4.5 Ultrases Geçiş Hızları

Bir malzemenin ultrases geçiş hızı o malzemenin boşluk yapısına, dolayısıyla yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır (Akçaözoğlu vd., 2013). Betonun kompasitesi ve yoğunluğu azaldıkça ultrases geçiş hızı değeri de azalmaktadır (Whitehurst, 1951; Zoldners, 1971). Çalışma kapsamında üretilen numunelerin ultrasonik ses hızları ölçülmüş ve Çizelge 4.5'te verilmiştir. Neville ve Brooks (1993) ile Jones ve Gatfield (1955) normal betonlarda, iyi kalitedeki bir betonun ultrases geçiş hızınının 4.1 - 4.7 km/sn arasında olması gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında üretilen numunelerin ultrases geçiş hızları 28. günde 4.14 - 4.67 arasında değişmektedir. Tüm günler için ise 3.14 - 5.61 arasında değişmektedir. Numunelerin ultrases geçiş hızlarınının 1. günde dahi yüksek çıkmasınının sebebinin kullanılan çimentonun ince mineral katkı içermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Çizelge 4.5.** Karışımlara ait ultrases geçiş hızları değerleri (km/sn)

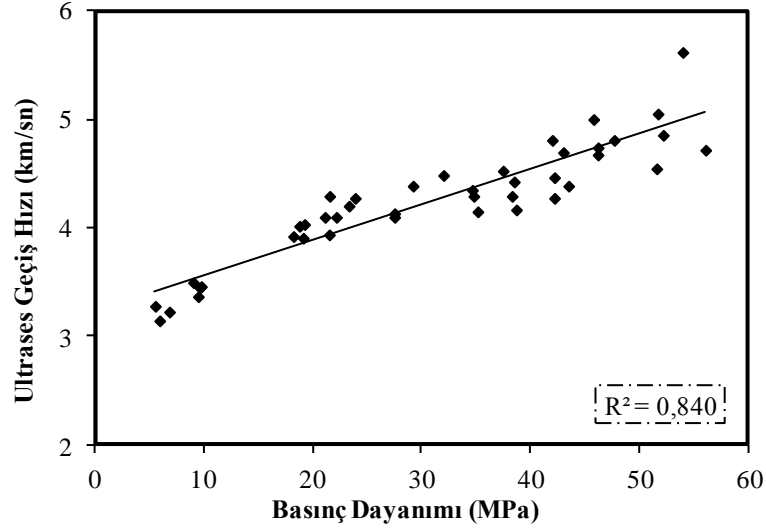
Karışım	1.Gün	3.Gün	7.Gün	28.Gün	90.Gün	180.Gün
Şahit	3,14	4,29	4,48	4,67	5,05	5,61
10U	3,27	3,92	4,09	4,29	4,69	5,00
10K	3,22	4,09	4,38	4,42	4,54	4,71
5U5K	3,36	3,93	4,13	4,16	4,27	4,38
20U	3,46	3,90	4,20	4,29	4,73	4,85
20K	3,49	4,01	4,09	4,14	4,52	4,80
10U10K	3,44	4,03	4,27	4,34	4,46	4,80

Çizelge 4.6'da normal betonlar için ultrasonik ses hızları ile beton kalitesi arasındaki ilişki verilmiştir. 28 günlük numunelerin ultrasonik ses hızı değerleri incelendiğinde, Çizelge 4.6'ya göre beton kalitesinin iyi ve çok iyi olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.6.** Ultrases geçiş hızlarınının pratik değerlendirilmesi (Güner ve Süme, 2000)

Hız (km/sn)	4.5 ve üstü	3.5 – 4.5	3.0 – 3.5	2.0 – 3.0	2.0 ve altı
Beton Kalitesi	Çok İyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok Zayıf

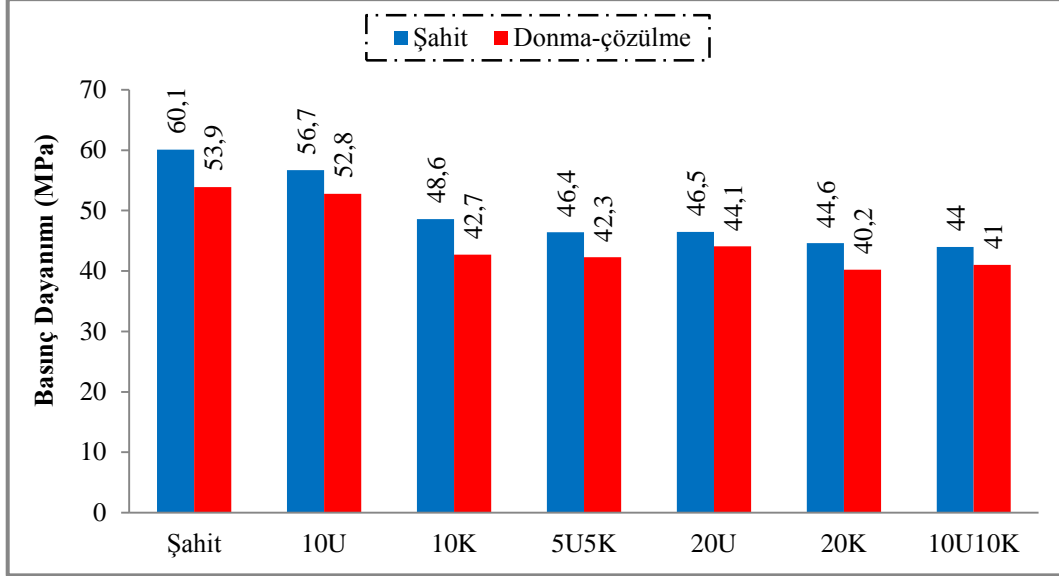
Çizelge 4.5 incelendiğinde beton yaşına bağlı olarak numunelerin ultrases geçiş hızlarının beton basınç dayanımına benzer şekilde arttığı görülmektedir. Şekil 4.3'te basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızları arasındaki ilişki verilmiştir. Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3. Basınç dayanımı ultrases geçiş hızı ilişkisi

#### 4.6 Betonun Donma Çözülme Dayanımı

Donma çözülme olayı betonun basınç mukavemeti etkileyen önemli faktörlerden bir tanesidir. Beton boşluklu bir yapıya sahip olup gözeneklerinde bulunan suyun, sıcaklık derecesinin sıfırın altına düşmesi sonunda donması, mukavemetinin azalmasına ve hatta parçalanmasına yol açabilir. Bu etkiler suyun donması sonucunda hacminin artmasından ileri gelmektedir (Postacıoğlu, 1987). Su donduğunda hacminde %9 oranında bir artış meydana gelir (Neville, 1993). Sürekli tekrarlanan donma - çözülme ile birlikte betonda hasar oluşmaya başlamaktadır ve betondaki hasar oluşumu betonun çatlaması veya yüzeyde oluşan soyulma ve dökülmeler olarak kendini göstermektedir (Şengül vd., 2003).



**Şekil 4.4.** Karışımlara ait betonların donma çözülme değerleri

Şekil 4.4’de karışımlara ait 150 donma çözülme çevrimi yapılmış ve donma çözülmeye maruz bırakılmamış beton numunelerin basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Tüm karışımlara ait numunelerde donma çözülme sonucu mukavemet kaybının olduğu görülmüştür. Çizelge 4.7.’de her karışıma ait basınç mukavemeti kaybının yüzde olarak değerleri verilmiştir. En fazla mukavemet kaybı 10K karışımında meydana gelmiştir. En az kayıp ise 20U karışımına ait beton numunesinde gözlenmiştir. 10K haricindeki diğer karışımlara ait beton numunelerinin basınç kaybı, Şahit karışımına ait beton numunesinin basınç kaybı yüzdesinden daha az olmuştur. Bu da göstermektedir ki; mineral katkıların betonun donma çözülme mukavemetine olumlu etkisi vardır. Bu durum literatürle uyusmaktadır (Uysal, 2011). Subaşı (2009) kompoze çimento ve uçucu kül kullanarak ürettiği numuneler üzerinde sodyum sülfat ile donma dayanıklılık deneyleri yürütmüş ve donma-çözülme dayanımının uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak önemli düzeyde değiştiğini, uçucu kül ikame miktarı arttıkça bununla ters orantılı olarak donma-çözülme dayanımının da azaldığını belirtmiştir. Bu durum yürütülen bu tez çalışmasıyla çelişmektedir.

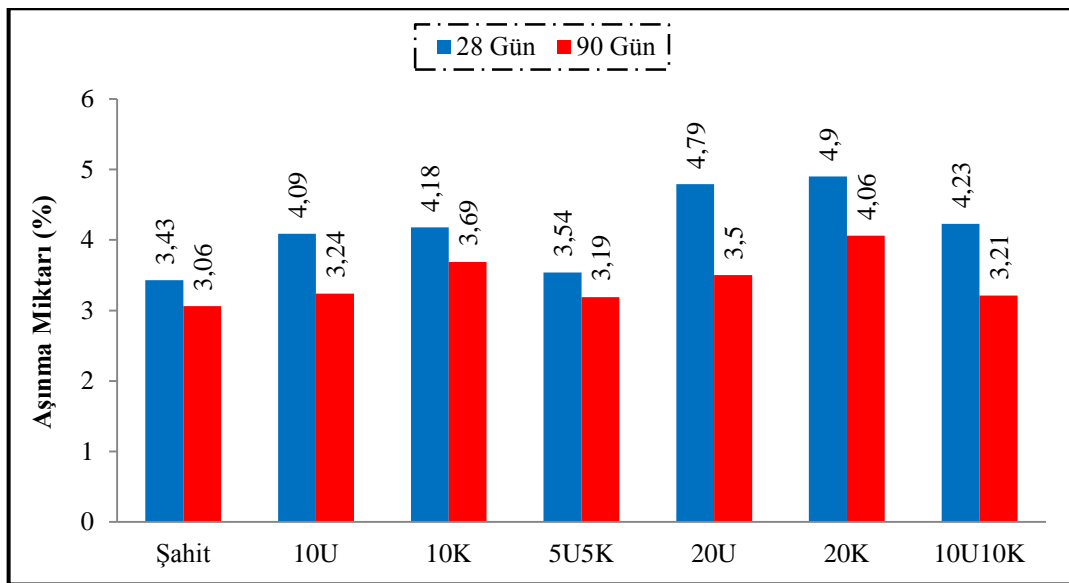
**Çizelge 4.7.** Karışımlara ait basınç mukavemeti kaybı (%)

Karışım	Şahit	10U	10K	5U5K	20U	20K	10U10K
Dayanım kaybı	10,3	6,9	12,1	8,8	5,2	10,1	6,9

#### 4.7 Aşınma Mukavemeti

Betonlar kullanım yerlerine bağlı olarak önemli ölçüde aşınmaya maruz kalabilirler. Betonun aşınma direnci basınç dayanımı, agrega tipi ve özellikleri, kür şartları ve yüzey düzgünlüğü gibi bir çok faktörden etkilenmektedir (Siddique vd., 2012)

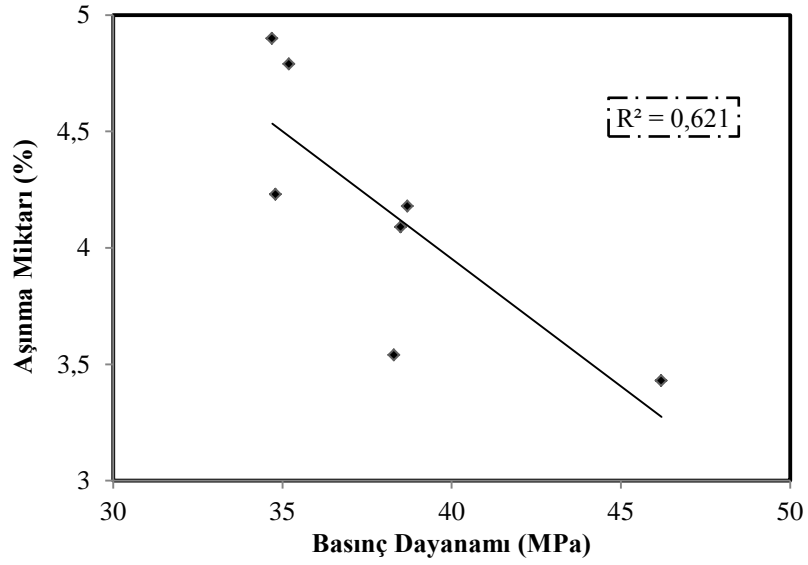
Yürütülen çalışma kapsamında hazırlanan numunelere ait yüzey aşınma değerleri, ağırlık kaybı esasına göre belirlenmiştir. Numunelere ait 28 ve 90 günlük Böhme yüzey aşınma miktarları Şekil 4.5’de sunulmuştur.



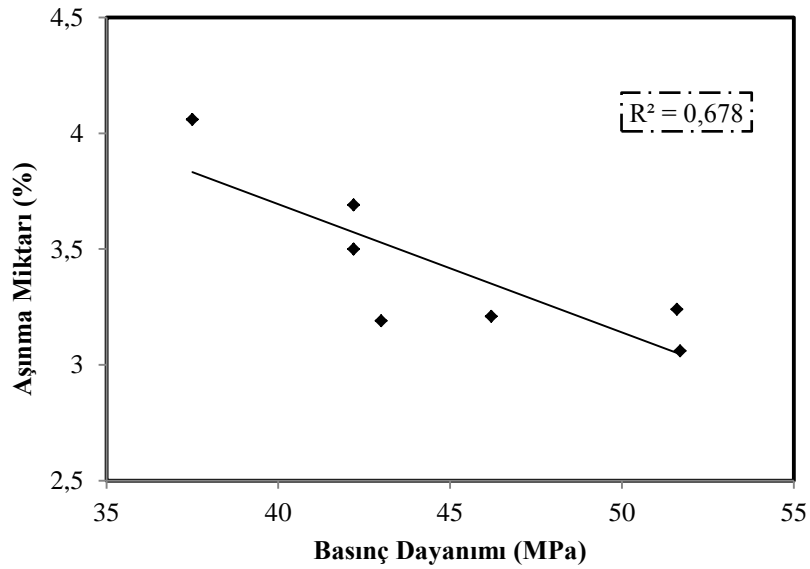
Şekil 4.5. Karışımlara ait aşınma miktarları

Şekil 4.5 incelendiğinde 90 günlük aşınma direncinin 28 günlük aşınma direncine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Betonun hidratasyonunun zamanla devam etmesi aşınma direncinin artmasına neden olmaktadır. 28 günlük numunelerde en az aşınma %3,43 ile Şahit karışımında, en fazla aşınma ise %4,9 ile 20K karışımında görülmüştür. 90 günlük numunelerde ise en az aşınma %3,06 ile Şahit karışımında, en fazla aşınma %4,06 ile 20K karışımında görülmüştür. Numunelerin aşınma mukavemetleri ile basınç mukavemetleri arasında benzerlikler vardır. Bu durum literatürle benzerlik göstermektedir (Larard ve Malher, 1991). Şekil 4.6’da 28 günlük numunelerin, Şekil 4.7’de ise 90 günlük numunelerin aşınma mukavemeti ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki sunulmuştur. Elde edilen veriler ile 28 ve 90 günlük numunelerin aşınma

mukavemeti ile basınç mukavemeti arasında korelasyon katsayıları sırasıyla 0,62 ve 0,68 olan doğrusal bir ilişki ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.6. 28 Günlük numunelerin basınç-aşınma dayanımı ilişkisi



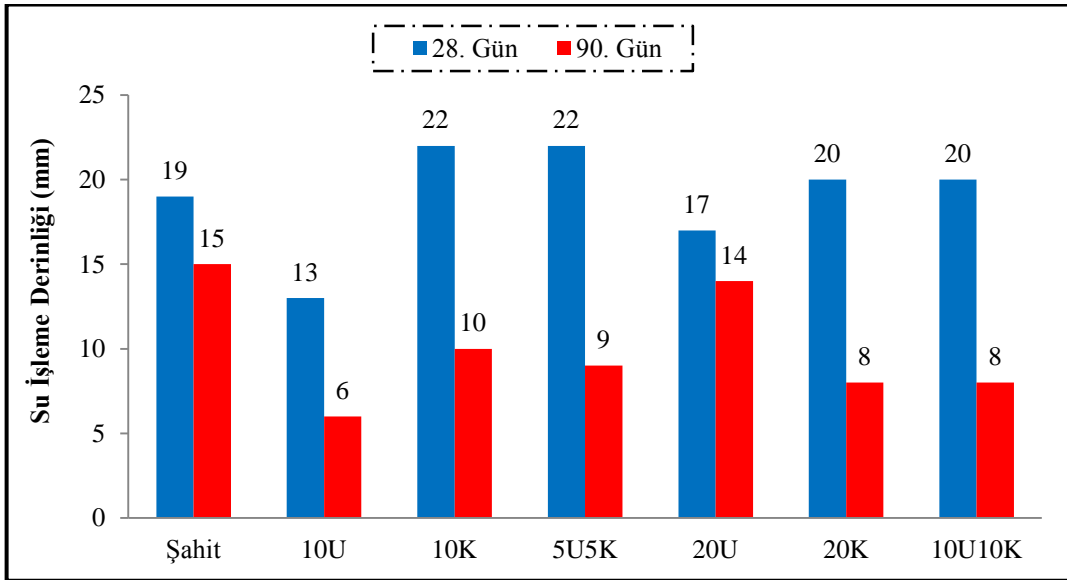
Şekil 4.7. 90 Günlük numunelerin basınç-aşınma dayanımı ilişkisi

#### 4.8 Basınç Altında Su İşleme Derinliği

Suyun beton malzemenin içine nüfuz etmesi sonucunda yapı yüzeylerinde kir, çiçeklenme, küf ve mantar gibi oluşumlar gözlenmektedir. Bunun yanı sıra, zeminde

bulunan sülfat vb. iyonlarının su ile birlikte malzeme içerisine girmesi sonucu kimyasal bozulmalara da rastlanmaktadır. Bu kimyasal reaksiyonlar sonucu malzeme içindeki boşluk sayısı hızla artar.

Su, betonda olduğu kadar içindeki çelik üzerinde de büyük hasarlar oluşturmaktadır. Donatı ile bulunduğu noktalarda korozyonu başlatıp, statik ve dinamik tüm yükleri karşılayan ve aktaran yapı bölümlerinin zarar görmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple, yer altı suyunun betona işleme derinliğinin, pas payı değerinden daha az olması gerekmektedir. Ancak bu durumda donatı korozyon olayında korunur ve yapının sürdürülebilirliği sağlanabilir (Şimşek ve Akıncıtürk, 2006).



Şekil 4.8. Basınç altında su işleme derinliği değerleri (mm)

Bu çalışmada, her karışımından 3 numune üzerinde 28. ve 90. günlerde basınç altında su işleme derinliği deneyi yapılarak su işleme derinliği tespit edilmiştir. Şekil 4.8’de karışımlara ait basınç altında su işleme derinlikleri verilmiştir. Şekil 4.8 inceliğinde, numune yaşı arttıkça karışımlara ait beton numunelerin de zaman artışı ile doğru orantılı şekilde su işleme dayanıklılığı artmaktadır. 28.gündeki basınç altında su işleme derinlikleri incelendiğinde, 10U karışımına ait beton numunesinin 13 mm ile en düşük su işleme derinliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. 22 mm su işleme derinliği ölçülen 10K karışımı ise en yüksek su işleme derinliğine sahip olmuştur. Uçucu kül katkısının, karışımlara ait 28. Günde basınç altında su işleme derinliğine olumlu bir etkisi

gözlenmiştir. Şimşek ve Akıncıtürk'e (2006) göre puzolanik katkıların, betonun basınç altında su işleme değerine olumlu bir etkisi vardır.

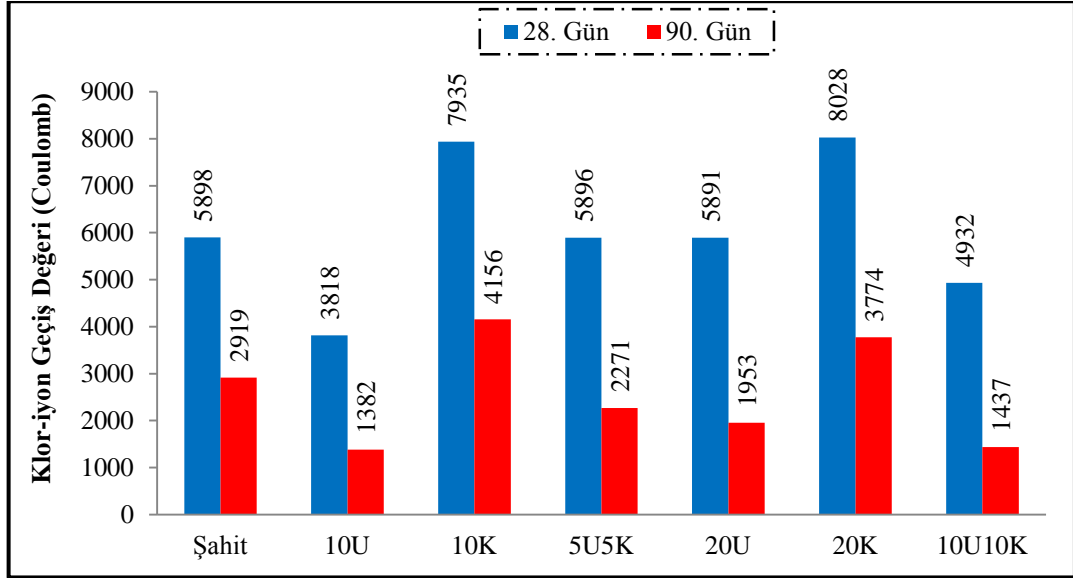
90. gündeki basınç altında su işleme derinliği incelendiğinde, 10U karışımına ait beton numunesinin 6 mm ile en düşük su işleme derinliğine sahip olduğu gözlenmiştir. 15 mm su işleme derinliği ölçülen Şahit karışımı ise en yüksek su işleme derinliğine sahip olmuştur. Fakat Kalsit katkısının beton üzerindeki su işleme derinliğine etkisi 28. güne oranla 90. günde daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum literatürle benzerlik göstermektedir (Sevim ve Okumuş, 2011).

#### **4.9 Klor İyon Geçirgenliği**

Klor iyonları donatı korozyonu açısından en zararlı madde olarak madde kabul edilir. Betonla temas halindeki deniz suyu veya tuzlu yer altı suları, buz çözücü tuzlar, tuz üreten veya işleyen sanayi tesisleri önemli birer klorür kaynağıdır. Tekrarlı ıslanma kuruma etkisine maruz deniz yapılarında deniz suyu ile beton içerisine sızan klorür iyonları, suyun buharlaşması sonucu beton içerisinde kalmakta, tekrar sayısı arttıkça klorür yoğunluğu da artmaktadır. Bu durumda deniz suyundaki iyon konsantrasyonundan daha fazla klor, beton içerisinde birikebilmektedir. Betonunun suya, gazlara ve iyonlara karşı geçirimsizlik özelliği en önemli koruma faktörüdür (Aydın ve Yıldırım, 2012).

DeneySEL çalışma kapsamında üretilen beton numuneleri üzerinde 28. ve 90. günlerde hızlandırılmış klor iyon geçirgenliği tayini deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi, beton yaşı arttıkça klor iyon geçirgenliği azalmaktadır. 28 günlük beton numunelerinin klor iyon geçirgenliği incelendiğinde, 3818 Coulomb değeri ile 10U karışımının klor iyon geçirgenliği direncinin en yüksek olduğu tespit edilmiştir. 8082 Coulomb değeri ile 20K karışımı ise en düşük klor iyon direncine sahip olmuştur. 28 günlük beton numunelerinin klor iyon geçirgenliği incelendiğinde, Uçucu kül katkısının, beton numunelerinin klor iyon geçirgenlik direncini arttırdığı görülmektedir. Thomas ve Matthews (2004) uçucu kül kullanılan betonlarda klor geçirimsizliğinin, portland çimentosu karışımlarından daha az olduğunu belirtmektedir. Yüksek oranda puzolan kullanımının betonun klor geçirimsizliğini büyük ölçüde azalttığı değişik araştırmacılar tarafından da belirtilmiştir (Şengül vd., 2003).

Ancak Kalsit katkısının betonun klor iyon geçirgenliğine herhangi bir olumlu etkisi görülmektedir. Hatta %10 ve %20 Kalsit ilavesinde betonun klor iyon geçirgenliği oldukça artmıştır. Akın (2009)'a göre, Kalsit katkılı betonların daha geçirimli olduklarını ve bu sebeple klor iyon geçirgenliklerinin yüksek olacağını belirtmişlerdir.



**Şekil 4.9.** Karışımlara ait klor-iyon değerleri (coulomb)

90 günlük beton numunelerinin klor iyon geçirgenliği incelendiğinde ise, 1382 Coulomb değeri ile 10U karışımının klor iyon geçirgenliği direncinin en yüksek olduğu tespit edilmiştir. 4156 coulomb değeri ile ise 10K karışımının klor iyon geçirgenliği direncinin en düşük olduğu gözlenmiştir. Uçucu kül ve kalsitin 90. gündeki etkileri 28. gündeğine benzer bir davranış sergilemiştir. Çizelge 4.8'de tüm beton karışımlarına ait iyon geçiş değerleri ile bu değerlere karşılık gelen ASTM C 1202 (2007) standardına göre geçirimlilik sınıfları verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** Beton numunelerin hızlı klor-iyon geçişi değerleri

<b>Karışım Adı</b>	<b>Yük 28. Gün</b>	<b>Geçirgenlik Sınıfı</b>	<b>Yük 90. Gün</b>	<b>Geçirgenlik Sınıfı</b>	<b>Geçirgenlik Sınıfı</b>
Şahit	5898	YÜKSEK	2919	ORTA	>4000 YÜKSEK 4000-2000 ORTA 2000-1000 DÜŞÜK 1000-10 ÇOK DÜŞÜK <100 İHMAL EDİLEBİLİR
10U	3818	ORTA	1382	DÜŞÜK	
10K	7935	YÜKSEK	4156	YÜKSEK	
5U5K	5896	YÜKSEK	2271	ORTA	
20U	5891	YÜKSEK	1953	DÜŞÜK	
20K	8028	YÜKSEK	3774	ORTA	
10U10K	4932	YÜKSEK	1437	DÜŞÜK	

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Mikrokalsitin taze beton özellikleri üzerinde olumlu bir etkisi görülmemiştir.
- Kalsit katkısının beton dayanımına ilk günlerde olumlu etkisinin olduğu görülmüş, ilerleyen yaşlarda dayanıma katkısı azalmıştır.
- Beton yaşına bağlı olarak numunelerin ultrases geçiş hızlarının arttığı görülmüştür. Numunelerin ultrases geçiş hızları 1. günde dahi yüksek çıkmıştır. Bunun sebebinin kullanılan çimentonun ince mineral katkı içermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Tüm karışımlara ait numunelerde donma çözülme sonucu mukavemet kaybının olduğu görülmüştür. En fazla mukavemet kaybı 10K karışımında meydana gelmiştir. En az kayıp ise 20U karışımına ait beton numunesinde gözlenmiştir. 10K haricindeki diğer karışımlara ait beton numunelerinin basınç kaybı, Şahit karışımına ait beton numunesinin basınç kaybı oranından daha az olmuştur. Mineral katkıların betonun donma çözülme mukavemetine olumlu etkisi vardır.
- 90 günlük aşınma direncinin 28 günlük aşınma direncine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Numunelerin aşınma mukavemetleri ile basınç mukavemetleri arasında benzerlikler vardır.
- Betonun yaşı artıkça karışımlara ait beton numunelerin de zaman artışı ile doğru orantılı şekilde su işleme dayanıklılığı artmaktadır. Uçucu kül katkısının, karışımlara ait 28. Günde basınç altında su işleme derinliğine olumlu bir etkisi gözlenmiştir. Puzolanik katkıların betonun basınç altında su işleme derinliği üzerinde olumlu bir etkisi vardır. Kalsit katkısının beton üzerindeki su işleme derinliğine etkisi 28. güne oranla 90. günde daha belirgin hale gelmiştir.

- Beton yaşı artıkça klor iyon geçirgenliği azalmaktadır. 28 günlük beton numunelerinde, Uçucu kül katkısının klor iyon geçirgenlik direncini arttırdığı görülmüştür. Ancak Kalsit katkısının betonun klor iyon geçirgenliğine herhangi bir olumlu etkisi görülmektedir.

## KAYNAKLAR

Adriano, D.C., Page, A.L., Elseewi, A.A., Chang, A.C., and Straughan, I. “Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: A review”, *Journal of Environmental Quality* 9, 333-334, 1980.

Akçaözoğlu, S., Akçaözoğlu, K. and Atış, C.D., “Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)”, *Composites: Part B* 45(1), 721-726, 2013.

Akın, M., Kalsit katkılı betonların geçirimsizlik ve dayanıklılık özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 4-5, 2009.

Akkaya, Y., Kesler, Y.E., “Mikrokalsit Katkısının Betonun İşlenebilirliğine, Mekanik Özelliklerine ve Dayanıklılığına Etkisi”, *İMO Teknik Dergi* 384, 6051-6061, 2012.

Akman, M. S., Öztekin, E., Erdinç, M., “Düşük çimento dozajlı ve uçucu kül katkılı hazır betonlarda dayanım ve dayanıklılık”, *TMMOB 3. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, s.297-310, 1994.

ASTM C125, Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 1994.

ASTM C 597-09, Standard test method for pulse velocity through concrete, *Annual Book of ASTM Standards* , USA; 2009.

ASTM C 618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 1994.

ASTM C 1202, standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration, *Annual Book of ASTM Standards* USA, 2007.

ASTM C 1202-05, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability

Atiş, C. D., ‘‘Yüksek oranda uucu kl kullanımı ile betonun aşınması’’, *İMO Teknik Dergi* 11(4), 2217-2230, 2000.

Atiş, C. D., ‘‘Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash’’ *Construction and Building Materials* 17, 147-152, 2003.

Atiş, C. D., Akazoğlu, K., Ekiz, N., ‘‘Uucu kln beton karakteristiklerine etkisi üzerine bir literatr taraması’’, *DSİ Teknik Blteni*, 37-52, 2002.

Atiş, C. D., Kılı, A., Sevim, U. K., ‘‘Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash’’, *Cement and Concrete Research* 34, 99-102, 2004.

Aydın, E.G and Yıldırım, H., ‘‘The effect of mineral admixtures and micronized calcite on alkali silica reaction expansions in the usage of aggregates from different origin’’ *International Journal of Physical Sciences* 7(45), 5996-6011, 2012.

Bai, Y., Darcy, F., Basheer, P.A.M., ‘‘Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate, *Cement and Concrete Research* 19, 691-697, 2005.

Berry, E.E., and Malbotra, V.M., Fly Ash in Concrete, *Canada Centre For Mineral and Energy Technology*, Canada, 1986.

Bhattacharjee, U., Kandpal, T.C., ‘‘Potential of fly ash utilisation in India’’, *Energy* 27(2), 151-166, 2002.

Bleszynski, R.F., Thomas, M.D.A., ‘‘Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions’’, *Advanced Cement Based Material* 7, 66-78, 1998.

Carette, G.G., Malhotra, V.M., ‘‘Characterization of Canadian fly ashes their relative performance in concrete’’, *Canadian Journal of Civil Engineering* 14, 667, 1987.

Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., Sirivivatnanon, V., “Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of research”, *Blended Cement Mortar Cement and Concrete* 34, 1087-1092, 2004.

Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T., “Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste”, *Cement and Concrete Composites* 27,425-428, 2005.

Cook, J.E., “Fly ash in concrete-technical considerations”, *Concrete International*, 51-59, 1983.

Demir A., “Uçucu küllü fazbeton araştırması”, *Türkiye İnşaat Mühendisliği X. Teknik Kongre Bildiriler Kitabı*, Ankara, s. 403-423, 1989.

Dunstan, M.R.H., “Design of mix proportions for the efficient use of fly ash in concrete” *Second International Conferences on Ash Technology and Marketing*, London, s. 445-454, 1984.

Erdoğan, T. Y., *Admixtures for Concrete*, METU Press, Ankara, 1996.

Erdoğan, T. Y., *Beton*, ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., Ankara, 2003.

Erdoğan, T. Y., *Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri*, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 2004.

Erdoğan, S.T., Erdoğan, T.Y., *Sorular ve Yanıtlarıyla Beton*, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul , 2006.

Gebler, S.H., Klieger, P., “Effect of fly ash on the durability of air entrained concrete” *Proceedings of ACI/Canmed Second International Conference on Fly Ash*, Madrid, s. 483-519, 1986.

Gökçe, A., Uyan, M., Öztekin, E., “İnceliğe bağlı olarak uçucu küllü betonların su ihtiyacındaki değişim”, *TMMOB 4. Ulusal Beton Kongresi, Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar*, İstanbul, s. 209-221, 1996.

Görhan, G., Hafif yapı blokları üretiminde uçucu külün kireç ve çimento ile birlikte kullanımının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, s. 18-67, 2006.

Güner, M. S. ve Süme, V., Yapı Malzemesi ve Beton, *Aktif Yayınevi*, İstanbul, 2000.

Günindi, İ., Yumurtalık Sugözü uçucu külü içeren betonların basınç, eğilme ve aşınma dayanımlarının araştırılması, Yüksel Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2006.

Hamalı, Y., Metakaolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2007

Hassan, K.E., Cabrera, J.G., Maliche, R.S., “The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete”, *Cement and Concrete Composites* 22, 267-271, 2000.

Jones, R. and Gatfield, E.N., Testing concrete by an ultrasonic pulse technique, *H.M. Stationery Office*, London, 1955.

Kamon, M., Katsumi, T., Sano, Y., “MSW Fly ash stabilized with coal ash for geotechnical application”, *Journal of Hazardous Materials* 76(2-3), 265-283, 2000.

Karahan, O., Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2006.

Kaymak, H., Kendiliğinden yerleşen betonlarda metakaolin ve kalsit kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2010.

Koç, M.E., Hava sürüklenmiş betonların donma-çözülme dayanımları ve görüntü işleme tekniği ile boşluk yapılarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2012.

Larard, F., Malier, Y., “Çok yüksek mukavemetli betonların mühendislik özellikleri”, *2.Ulusal Beton Kongresi Yüksek Dayanımlı Beton*, İstanbul, 1991.

Malhotra, V.M., “Supplementary Cementing Materials for Concrete”, *Canmet*, 52-56, 1987.

Malhotra, V.M., “İlave bağlayıcı maddelerin betondaki önemi”, *Çevre Sağlığı Güvenliği Hazır Beton dergisi* 13(3), 33, 1996.

Mara, E.P., Paya, J., Monzo, J., “Influence on different sized fractions of a fly ash on workability of mortars”, *Cement and Concrete Research* 23(4), 917-924, 1993

Matschei T., Lothenbach B., Glasser F.P., “The role calcium carbonate in cement hydration”, *Cement and Concrete Research* 37, 551-558, 2007.

MEHTA, P.K., “Standard specifications for mineral admixtures an overview”, *Proceedings of ACI/Canmet Second International Conference*, USA, 1986.

Monteiro, P.J.M., Kurtis, K.E., “Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack”, *Cement and Concrete Research* 33, 987-993, 2003.

Nebiloğulları, M.A, Metakaolin, Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül Katkısının Beton Hidratasyon Sıcaklığına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2010.

Nelson, P., Srivivatnanon, V., Khatri, R., “Development of high volume fly ash concrete for pavements”, *Proceedings. of the Surfacing Workshop: 16th ARRB Conference*, Australia, 1992.

Neville, A.M., Brooks, J.J., Concrete Technology, *Longman Scientific and Technical*, USA, 1993.

Özcan, F., Silis dumanı içeren harç ve betonların ve hızlandırılmış kür ile dayanım tahmini, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana 2005.

Özcan, M., Tunçbilek ve Seyitömer uçucu küllerin beton özelliklerine etkisi ve etkinlik katsayısının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1997.

Özdemir, E., PÇ ve mineral katkı maddelerinin ikili, üçlü ve dörtlü kombinasyonlarını içeren harç numunelerinin bazı özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2006.

Özdemir, O., Uçucu külün yapı malzemelerinde bağlayıcılığa etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2007.

Özer, E., Niğde Yöresi Fesleğen Yayla kaolin kilinden metakaolin üretilebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2009.

Özgür, S., Türkiye çimento sanayi ve üretilen çimento türleri, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 1996.

Öztekin, E., Cimilli, T., “History and use of blended cements in Turkey”, *Cement, Concrete and Aggregates* 9, 44-48, 1987.

Özturan, T., “Beton üretiminde uçucu kül kullanımının irdelenmesi”, *TMMOB Türkiye İnşaat Mühendisliği XI. Teknik Kongresi*, İstanbul, s.149-158, 1991.

Öztürk, A.Ç., Tuğla üretiminde termik santral atığı puzolanik uçucu küllerin değerlendirilmesi üzerine bir araştırma, Doktora Tezi, *Mimar Sinan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 24-46, 2001.

Poon, C.S., Wong, Y.L., “A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash”, *Cement and Concrete Research* 30, 447-455, 2000.

Postacıoğlu, B., Beton, *Matbaa Teknisyenleri Basımevi*, İstanbul, 1987.

Ramachandran, V.S., Concrete Admixtures Handbook, *Noyes Publications*, New Jersey, 1984.

Ramyar, K., Effects of Turkish fly ashes on the portland cement-fly ash systems, *Metu, In Civil Engineering*, PhD Thesis, Ankara, s. 208, 1993.

Rao, G.A., “Long-term drying shrinkage of mortar-influence of silica fume and size of fine aggregate”, *Cement and Concrete Research* 31(2), 171-175, 2001.

Sahmaran, M., Li V.C., “Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash”, *Cement and Concrete Research* 39, 1033-1043, 2009.

Schure, M., “Surface area and porosity of fly. ash”, *Environment Science Technoly* 19, 82-86, 1985.

Sevim, U.K., Afşin-Elbistan termik santralı uçucu külünün çimento hamuru ve harç numuneler üzerindeki etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2003.

Sevim, U.K., Okumuş, N., “Zeolit ve silika katkılı betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 26(2), 55-61, 2011.

Siddique, R., Kapoor, K., Kadri, E., Bennacer, R., “Effect of polyester fibres on the compressive strength and abrasion resistance of HVFA concrete”, *Construction and Building Materials* 29, 270-278, 2012.

Sprung, S., Siebel, E., “Assessment of the suitability of limestone for producing portland limestone cement (PKZ)”, *Zement-Kalk-Gips* 44(1), 1-11, 1991.

Subaşı, S., “Portland kompoze çimentolu betonlarda uçucu kül ikamesinin donma-çözülme dayanıklılığına olan etkisi”, *New World Sciences Academy* 4(2), 67-76, 2009.

Şimşek, Z., Akıncıtürk, N., “Betonarme yapı elemanları üzerindeki basınçlı yeraltı su geçirimsizliğine puzzolan katkı maddelerinin etkisi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 11(2), 13-19, 2006.

Şengül, Ö., Taşdemir, C., Koruç, Ş., Sönmez R., “Agrega türünün betonun donma - çözülme dayanıklılığına etkisi”, *3. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul, s. 43-50, 2003.

Şengül, Ö., Taşdemir, M. A., Sönmez, R., “Yüksek oranda uçucu kül içeren normal ve yüksek dayanımlı betonların klor geçirimsizliği”, *5. Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı*, İstanbul, s. 483-492, 2003.

Thomas, M.D.A., Matthews, J.D., “Performance of pfa concrete in a marine environment 10 years results”, *Cement and Concrete Composites* 26, 5–20, 2004.

Tokyay, M., Termik santral küllerinin çimento ve beton katkı maddesi olarak kullanılma imkanlarının etüt ve envanteri projesi raporu, *TC Başbakanlık Çevre Müsteşarlığı, Teknoloji ve Ekonomi Dairesi Başkanlığı*, Ankara, 1990.

Tokyay, M., Erdoğan, K., “Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu”, *TÇMB AR-GE*, Ankara, s. 69, 1998.

TOPÇU, İ., Beton Teknolojisi, *Uğur Ofset A.Ş.*, Eskişehir, 2006.

TS 802, Beton Karışım Hesapları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2009.

TS EN 197–1, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2012.

TSE EN 206-1/A, Beton - Bölüm 1: Özellik , performans, imalât ve uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2005.

TS EN 934-2, Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton katkıları-Tarifler, özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2002.

TSE EN 1008, Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2003.

TS EN 1097-6, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler – Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2002.

TS 2824 EN 1338, Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2005.

TS 3449, Çabuk donma ve çözülme koşulları altında betonda dayanıklılık faktörü tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2005.

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

TS EN 12350-5, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 5: Yayılma tablası deneyi, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TS EN 12350-7, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 7: Hava muhtevasının tayini - Basınç yöntemleri, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TS EN 12390-3, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabii tutulması, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TS EN 12390-8, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

Uysal, M., Mineral katkıları kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerinin ve dayanıklılığının incelenmesi, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 2010.

Uysal, M., “Mineral katkılı betonların donma-çözülme etkisi altındaki davranışının incelenmesi”, *THBB Kongresi*, İstanbul, 2011.

Ünal, O., Uygunoğlu, T., “Uçucu Küllü betonların donma-çözülme karşı dayanıklılığının araştırılması”, *İMO 17. Teknik Kongre*, İstanbul, 2004.

Vu, D.D., Strength Properties of Metakaolin-Blended Paste, Mortar and Concrete, *Delft University Press*, Netherlands, 2002.

Wasti, Y., “Uçucu küllerin geoteknik uygulamalarda kullanımı”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, s. 37-44, 1993.

Whitehurst, E.A., “Soniscope tests concrete structures; Research and development laboratories of the portland cement association”, *J Am Concr Inst* 47, 433-444, 1951.

Yazıcı, Ş., Baradan, B., “Uçucu kül katkılı yüksek dayanımlı beton”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara, s.59-71, 1995.

Yeğinobalı, A., “Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı”, *TÇMB/AR-GE/Y01.01*, Ankara, s. 7-8, 2005.

Zoldners, N.G., “Thermal properties of concrete under sustained elevated temperatures”, *ACI Publ SP-25* (8), 1-31, 1971.

## **ÖZ GEÇMİŞ**

Şükrü Emre Güldür 07.05.1987 tarihinde Adana'da doğdu. İlk orta ve lise öğretimini Adana'da tamamladı. 2006 yılında girdiği Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Haziran 2011'de mezun oldu. 2011 yılından bu tarihe kadar Tema Beton Yapı Elemanlarında şantiye şefi olarak çalışmaktadır. Bilim dalındaki ilgilendiği alan ise yapı malzemesidir.

