



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**UÇUCU KÜL KATKISIYLA ÜRETİLEN HARÇLARIN
DAYANIM VE DAYANIKLILIĞININ ARAŞTIRILMASI**

**İnş.Müh. Nurullah MERCAN
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Programı**

**Danışman
Doç.Dr. Fahriye M. KILINÇKALE**

Ekim, 2007

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**UÇUCU KÜL KATKISIYLA ÜRETİLEN HARÇLARIN
DAYANIM VE DAYANIKLILIĞININ ARAŞTIRILMASI**

**İnş.Müh. Nurullah MERCAN
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Programı**

**Danışman
Doç.Dr. Fahriye M. KILINÇKALE**

Ekim, 2007

İSTANBUL

Bu çalışma 22.10.2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı Yapı programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç.Dr. Fahriye M. KILINÇKALE (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof.Dr. Abdurrahman GÜNER
Namık Kemal Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof.Dr. Fevziye AKÖZ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof.Dr. Namık Kemal ÖZTORUN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Y.Doç.Dr. Hasan YILDIRIM
İstanbul Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak bana rehber olup yol gösteren Hocam Sayın Doç. Dr. Fahriye M. KILINÇKALE'ye,

Her konuda benden yardım ve desteklerini esirgemeyen Araş. Gör. Kemal ÇELİK'e,

Çalışmalarım sırasında tüm samimiyetleri ve iyi niyetleriyle ile benden yardımlarını esirgemeyen başta Öğrenci Asistan Alican TARAZ olmak üzere, İnş. Yük. Müh. Sibel GİRĞİNKARDEŞLER ve Emre YALÇIN arkadaşlarıma,

Yaşadığım süre zarfında daima yanımda olup beni destekleyen sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ekim, 2007

Nurullah MERCAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
SEMBOL LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
SUMMARY.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. BETON VE ÖZELLİKLERİ.....	3
2.2. DAYANIKLILIK (DURABİLİTE).....	5
2.3. BETONA KATILAN MİNERAL KATKILAR	6
2.3.1. Doğal Puzolanlar.....	7
2.3.2. Yapay Puzolanlar.....	7
2.3.2.1. Uçucu Kül.....	7
2.3.2.2. Silis Dumanı.....	7
2.3.2.3. Prinç Kabuğu Külü.....	7
2.4. UÇUCU KÜL.....	8
2.4.1. Uçucu Külün Tanımı ve Tarihçesi.....	8
2.4.2. Uçucu Kül Eldesi.....	9
2.4.3. Uçucu Kül Özellikleri.....	10
2.4.3.1. Fiziksel Özellikleri.....	10
2.4.3.2. Kimyasal Özellikleri.....	11
2.4.3.3. Minerolojik Yapısı.....	12
2.4.4. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması.....	13
2.4.5. Uçucu Külün Kullanım Alanları.....	16
2.4.5.1. Çimentoda Kullanımı.....	16
2.4.5.2. Agregada Olarak Kullanımı.....	18

2.4.5.3. <i>Betonda Kullanımı</i>	18
2.4.5.4. <i>Kerpiç Yapımında Kullanımı</i>	20
2.4.5.5. <i>Tuğla Yapımında Kullanımı</i>	20
2.4.5.6. <i>Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanımı</i>	20
2.4.5.7. <i>Yol İnşaatlarında Kullanımı</i>	21
2.4.5.8. <i>Geoteknik Çalışmalarda Kullanımı</i>	21
2.4.6. Çimentoda Uçucu Kül Kullanımının Etkileri	22
2.4.6.1. <i>Teknik Etki</i>	22
2.4.6.1.1. <i>Dayanım</i>	23
2.4.6.1.2. <i>Dayanıklılık</i>	24
2.4.6.2. <i>Ekolojik ve Ekonomik Etki</i>	28
2.4.7. Türk Standartlarında Uçucu Kül	28
2.5. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI	29
3. MALZEME VE YÖNTEM	31
3.1. KULLANILAN MALZEMELER	31
3.1.1. <i>Çimento</i>	31
3.1.2. <i>Uçucu Kül</i>	32
3.1.3. <i>Kum</i>	32
3.2. NUMUNE ÜRETİMİ	32
3.3. YAPILAN DENEYLER	35
3.3.1. Mekanik Deneyler	35
3.3.1.1. <i>Eğilme Dayanımı Deneyi</i>	35
3.3.1.2. <i>Basınç Dayanımı Deneyi</i>	36
3.3.2. Fiziksel Deneyler	37
3.3.2.1. <i>Su Emme Deneyi</i>	37
3.3.3. Durabilite Deneyleri	38
3.3.3.1. <i>Ultrases Hızı</i>	38
3.3.3.2. <i>Ağırlık Değişimi Deneyi</i>	38
4. BULGULAR	39
4.1. MEKANİK DENEY SONUÇLARI	39
4.1.1. <i>Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları</i>	39
4.1.2. <i>Basınç Dayanımı Deney Sonuçları</i>	43
4.2. FİZİKSEL DENEY SONUÇLARI	47

4.2.1. Su Emme Deney Sonuçları.....	47
4.3. DURABİLİTE DENEYLERİ SONUÇLARI.....	50
4.3.1. Ultrases Hızı Deney Sonuçları.....	50
4.3.1. Ağırlık Değişimi Deney Sonuçları.....	53
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	56
5.1. MEKANİK DENEY SONUÇLARI.....	56
5.2. FİZİKSEL DENEY SONUÇLARI.....	58
5.3. DURABİLİTE DENEY SONUÇLARI.....	59
KAYNAKLAR.....	64
EKLER.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	69

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Puzolanların Sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.2	: Tipik bir F sınıfı uçucu külün SEM’deki görüntüsü.....	12
Şekil 3.1	: Numunelerin üretimi ve muhafazası.....	34
Şekil 3.1.a	: Harç mikseri.....	34
Şekil 3.1.b	: Harç kalıpları.....	34
Şekil 3.1.c	: Sarsma tablası.....	34
Şekil 3.2	: Eğilme Dayanımı Deneyi.....	36
Şekil 3.3	: Basınç Dayanımı Deneyi.....	37
Şekil 3.4	: Etüv.....	38
Şekil 4.1	: Eğilme dayanımlarının referans numune eğilme dayanımına oranı.....	42
Şekil 4.1.a	: 7. gün / 28. gün referans.....	42
Şekil 4.1.b	: 28. gün / 28. gün referans.....	42
Şekil 4.1.c	: 56. gün / 28. gün referans.....	42
Şekil 4.2	: Basınç dayanımlarının referans numune basınç dayanımına oranı.....	46
Şekil 4.2.a	: 7. gün / 28. gün referans.....	46
Şekil 4.2.b	: 28. gün / 28. gün referans.....	46
Şekil 4.2.c	: 56. gün / 28. gün referans.....	46
Şekil 4.3	: Su emme miktarlarının referans numune su emme miktarına oranı.....	49
Şekil 4.3.a	: 7. gün / 28. gün referans.....	49
Şekil 4.3.b	: 28. gün / 28. gün referans.....	49
Şekil 4.3.c	: 56. gün / 28. gün referans.....	49
Şekil 4.4	: Islanma-kuruma etkisine maruz numunelerde hız değişim oranı.....	52
Şekil 4.4.a	: 56. gün / 28. gün, Laboratuar-Su.....	52
Şekil 4.4.b	: 56. gün / 28. gün, Su.....	52
Şekil 4.5	: Islanma-kuruma etkisine maruz numunelerde ağırlık değişimi oranı...	55
Şekil 4.5.a	: 56. gün / 28. gün, Laboratuar-Su.....	55
Şekil 4.5.b	: 56. gün / 28. gün, Su.....	55

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 : Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....	10
Tablo 2.2 : Türkiye’deki bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları.....	11
Tablo 2.3 : Türkiye’deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları.....	13
Tablo 2.4 : Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanlar.....	16
Tablo 2.5 : Uçucu kül ile ilgili Türk Standardları.....	29
Tablo 3.1 : CEM I tipi çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	31
Tablo 3.2 : Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri	32
Tablo 3.3 : Kumun tanecik büyüklük dağılımı.....	32
Tablo 3.4 : Numune üretiminde kullanılan uçucu kül ve çimento miktarları.....	33
Tablo 3.5 : Numune kodları.....	35
Tablo 4.1 : Numunelerin eğilme dayanımı değerleri.....	41
Tablo 4.2 : Numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	45
Tablo 4.3 : Numunelerin su emme değerleri.....	48
Tablo 4.4 : Islanma-kuruma etkisine maruz numunelerde ultrases hızı değişimi.....	51
Tablo 4.5 : Islanma-kuruma etkisine maruz numunelerde ağırlık değişimi.....	54

SEMBOL LİSTESİ

CH; (Ca(OH)₂)	: kalsiyum hidroksit
S; (SiO₂)	: silisyum dioksit (kuvartz)
A; (Al₂O₃)	: alüminyum oksit
F; (Fe₂O₃)	: demir oksit (hematit)
C; (CaO)	: kalsiyum oksit
M; (MgO)	: magnezyum oksit
CEM I	: katkısız portland çimentosu
F sınıfı uçucu kül	: silissi uçucu kül
C sınıfı uçucu kül	: kalkersi uçucu kül
ρ	: yoğunluk
C₄AS₃H₃₂	: candlot tuzu
f_e	: eğilmede çekme mukavemeti (N/mm ²)
b	: prizma kare kesitinin kenar uzunluğu (mm)
L	: destek prizma eksenleri arası uzaklık (mm)
f_c	: basınç dayanımı (N/mm ²)
P	: kırılmadaki en büyük yük (N)
W_S	: su emme oranı (%)
W_I	: ıslak kütle (g)
W_K	: kuru kütle (g)
W_D	: kütle değişimi (%)
W_t	: t süredeki kütle değişimi (g)
W₀	: başlangıçtaki (28. gündeki) kütle (g)

ÖZET

UÇUCU KÜL KATKISIYLA ÜRETİLEN HARÇLARIN DAYANIM VE DAYANIKLILIĞININ ARAŞTIRILMASI

Bu çalışmada, farklı özellikteki çimentoların uçucu kül katkısıyla harçların dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, beş farklı çimento üretim tesisinden (A, S, Ç, N ve L) alınan katkısız Portland çimentosuna (CEM I 42,5), 5%, 9% ve %14 oranlarında uçucu kül katkısı ikame edilmiştir. TS EN 196-1 standardına göre standart küre maruz referans deney numunelerinin 7., 28. ve 56. günlerde su emme değerleri, eğilme ve basınç dayanımları araştırılmıştır. Durabilite deneyi için numuneler ıslanma / kuruma çevrimlerine maruz bırakılmış, numunelerin 28. günden başlayarak 28. ve 56. günlerde ağırlık değişimleri ve ultrases hızları araştırılmıştır.

Uçucu kül katkılı çimentolar, Portland çimentosunda olmayan performans özelliklerine sahip olmanın yanında, elektrik endüstrisinin ikincil ürünlerinin faydalı bir şekilde kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Ancak değişik kimyasal, mineralojik ve fiziksel özelliklere sahip katkı malzemelerinin kullanılması çimento sisteminde önemli ölçüde farklılıklara neden olmaktadır.

Çalışma sonuçlarından, 28. günün sonunda %5 oranında uçucu kül katkılı çimentoların dayanımlarının katkısız çimentoların dayanımlarından büyük olduğu görülmektedir. Uçucu kül katkılı çimentolarda katkı oranının artması ile dayanım düşüşleri gözlenmiştir. Erken yaşlarda, uçucu kül katkılı numunelerin dayanımları, katkı miktarı arttıkça azalmakta ve referans numunelerin dayanımlarından düşük değerler almaktadır. Uçucu kül katkısıyla N ve S çimentoları diğer çimentolardan daha fazla dayanım artışı göstermektedir. Islanma / kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numuneler içerisinde en iyi performansı %9 uçucu kül katkısı içeren A9, N9 ve S9 numuneleri göstermektedir. Uçucu kül katkılı çimentolarda katkı oranının artması ile ıslanma / kurumaya olan dayanıklılığın azaldığı görülmektedir.

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE STRENGTH AND DURABILITY OF MORTAR PRODUCED BY FLY ASH AS ADDITIVE MATERIAL

In this study, the effect of fly-ash content and different cements of different properties on the strength and durability of mortars was investigated. For this purpose, Portland cements (CEM I 42,5) from five different plants (A, S, Ç, N and L) were blended with 5%, 9% and 14% replacement by mass of fly-ash. The TS EN 196–1 standard mortar control specimens cured under standard conditions were tested at 7th, 28th and 56th days for water absorption, flexural and compressive strengths. For durability test, mortar specimens subjected to wetting-and-drying cycles beginning on the 28th day were tested at the ages of 28 and 56 days for mass change and pulse velocity.

Fly ash blended cements are characterized not only by their performance properties that are absent in Portland cements, but they also represent gainful utilization of by-products from thermal electric power plants. However, the addition of blending materials of different chemical, mineralogical and physical properties introduces significant diversity into the cementing system.

The results show that the 28-day strength of the binders with 5% fly-ash substitution are higher than those with no fly-ash. Reductions in strength are observed with increasing fly ash replacements. At early ages, the strengths of the blended binders are less than those of pure Portland cements with fly ash contents, decreasing below those of the reference cement. The N and S cements exhibited higher increase in strength with increasing fly ash contents. The 9% fly-ash binders A9, N9 and S9 performed the best against wetting/drying cycles with 3,6%, 5,7% and 3,7% reduction in strength respectively. It was seen that the resistance against wetting-and-drying cycles decreased with increasing fly ash contents.

1. GİRİŞ

Katkılı çimentolar, günümüzde betonun maliyetini düşürmek, taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Mehta [1], bu yüzyılın başlarından itibaren katkılı çimentoların önemli derecede ilgi gördüğünü vurgulamaktadır. Güneyisi ve diğ. [2], aslında katkılı çimentoları modern toplumun ihtiyaçlarını karşılayan temel bir malzeme olarak tanımlamaktadır. Katkılı çimentolar, hem portland çimentosunda (CEM I'de) olmayan performans özelliklerine sahip olmakta hem de atık malzemelerin faydalı bir şekilde kullanılmasına imkân sağlamaktadır.

Betonun 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerleri önemli parametrelerdir. TS EN 197-1 standardında, çimentonun uygunluğunun tesbitinde ve dayanım sınıfının belirlenmesinde 28 günlük dayanım değerlerini esas alır. Ancak, birçok deney göstermiştir ki yeterli dayanıma sahip betonlar çoğu zaman tasarım aşamasında maruz kalacağı çevre koşullarının dikkate alınmaması veya yanlış ve yetersiz kür edilme gibi nedenlerle birçok özelliklerini kaybetmektedirler. Baradan ve diğ. [3], kompozit bir malzeme olan betonun yararlı mühendislik özelliklerini sürdürebilmesinin, dayanımının yanı sıra kalıcı olmasına bağlı olduğunu belirtmektedir. 2002 yılında kabul edilen ve 2004 yılında yürürlüğe giren TS EN 206-1 standardı, betonun bulunduğu ortamın göz önünde bulundurulması amacıyla, çevresel etki sınıflaması ve yıpratıcı etkilere karşı dayanıklılık için sınırlamalar getirmektedir. Bütün bu gelişmeler tasarım sırasında, betonun dayanımı ile birlikte betonun bulunduğu dış ortam etkilerinin göz önünde bulundurulması gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın amacı, uçucu kül katkısının farklı çevresel koşullar altında farklı çimentoların dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin araştırılmasıdır. Bu amaçla, beş farklı üretim tesisinde üretilen katkısız portland çimentoları, referans ve üç farklı oranda uçucu kül katkısı (%5, %9 ve %14) ile karıştırılarak 180 adet harç numunesi üretilmiştir. Harç numuneleri 7, 28 ve 56 güne kadar 20 ± 2 °C sıcaklıkta su içerisinde

bekletilmiştir. Kür süresi sonunda numunelere sırasıyla eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve su emme deneyleri uygulanmıştır.

Durabilite deneyleri için aynı özellikteki harçlardan, 28 günden başlayarak, laboratuvar ortamı-su ve sürekli su ortamlarında kür edilmek üzere 120 adet hazırlanmış ve bu numunelere 28. ve 56. günlerde ağırlık değişimi ve ultrases geçiş süresi deneyleri tatbik edilmiştir.

Bölüm 2’de, beton ve özellikleri, betonda dayanıklılık (durabilite), betona katılan mineral katkıları (puzolanlar), uçucu küllerin eldesi, özellikleri, sınıflandırılması, kullanım alanları açıklanmıştır.

Bölüm 3’te, bu çalışmada kullanılan malzemeler, bu malzemelerle üretilen harç karışımları, deneyler ve deneylerde kullanılan aletler açıklanmıştır.

Bölüm 4’te, yapılan deneylerin sonuçları tablolar ve grafikler halinde açıklanmıştır.

Bölüm 5’te, çalışma bulguları değerlendirilmiş ve varılan sonuçlar mevcut literatür bilgisi ile birlikte yorumlanmıştır. Çalışmanın geliştirilmesi için ileride yapılacak araştırmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. BETON VE ÖZELLİKLERİ

Beton kompozit bir malzeme olup agregaya ile çimento hamurunun sertleşmesinden meydana gelen bir bağlayıcıdan oluşmaktadır. Agreganın, çimento ve su ile karışımı betonu oluşturmaktadır [4].

Yapılan çalışmalarda [4, 5] beton özellikleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır. Beton üretildikten sonra iki şekilde bulunur:

1) Çimento, agregaya ve su ile karıştırıldığında kolayca şekil verilebilen bir malzemedir. Bu durumdaki betona “taze beton” denir, taze beton kalıba dökülerek sıkıştırılır.

2) Bileşenleri karıştırıldıktan birkaç saat sonra katı hale geçen; günlerle ölçülen bir süre sonra ise sertliği artan ve mukavemet kazanan, yeterince mukavemet kazanmış betona “sertleşmiş beton” denir. Beton, normal koşullarda 28 gün sonra nihaî mukavemetinin %60-90’ını kazanır.

Akman [4]’a göre, betonun basınç mukavemeti, betonun diğer tüm yararlı özellikleriyle paralellik gösterir. Yani basınç mukavemeti yüksek olan beton genelde doludur, serttir, su geçirmez, dış etkilere ve aşınmaya dayanıklıdır.

Basınç mukavemetini etkileyen en önemli etmen karma suyu miktarıdır. Diğer bileşenler en uygun kalite ve miktarda olsa bile karma suyu gereğince iyi ayarlanmamışsa basınç mukavemeti düşer. Çimentonun hidrasyonu için gerekli su, çimento ağırlığının yaklaşık %25’i kadardır. İşlenebilirlik için katılan su miktarı çimento ağırlığının %40-65’i kadardır. %25’in üzerindeki su buharlaşarak, sertleşmiş betonda çoğunluğu kılcal olan boşluklar bırakır ve mukavemetin düşmesine yol açar.

Betonda, karma suyu oranı %55'in üzerine çıkartılmamalıdır. Bu değerde işlenebilirlik sağlanamıyorsa agrega, özellikle kum değiştirilmelidir. Su/çimento oranını düşürmek için işlenebilirlikten fedakârlık edilmez. Yerine yerleştirelemeyen betonda oluşacak olan büyük boşluklar, mukavemette önemli düşüölere sebep olurlar.

Beton kompasitesi (doluluk oranı), aksi belirtilmedikçe taze beton kompasitesidir. Taze beton kompasitesi, 1 m³ yerine yerleşmiş betondaki katı öğelerin (agrega+çimento) mutlak hacimlerinin, toplam hacme oranıdır. İyi bir betonda kompasite %80'den büyük olmalıdır.

Katılaşma ve sertleşme aşamasındaki betonun içinde bulunduğu çevre şartlarına "kür şartları" denilir. Prizi etkileyen en önemli kür şartları, sıcaklık ve rutubettir. Betonun içinde bulunduğu ortamın bağıl nemi %50'nin altına düşerse, betondaki suyun hızla buharlaşması sonucu hidrasyon için gerekli suyun kalmaması söz konusudur. Ayrıca buharlaşmanın fazla olması, betonun büzülmesini de artırır ve betonda çatlaklar oluşturur. Hidrasyonunu yeterince yapamamış, çatlaklı bir betonun mukavemetinin önemli ölçüde düşeceği açıktır. Bu yüzden beton, üretimi izleyen 3-4 gün süresince sulanmalı ve nemli tutulmalıdır.

Betonun işlenebilirlik, mukavemet ve dayanıklılık gibi üç temel özeliği vardır, bunlar aşağıda kısaca verilmiştir.

1) İşlenebilirlik, taze beton özeliğidir. Taze beton kolay (minimum enerji ile) karıştırılabilir, kolay yerleştirilebilir; karıştırılırken, taşınırken ve yerleştirilirken ayrışmamalı ve homojenliği bozulmamalıdır.

2) Mukavemet, sertleşmiş beton özeliğidir. Beton taşıyıcı malzeme olduğundan, üretilen betonun projede öngörülen yükleri "emniyetle" taşınması gerekir. Betonun pratikte basınç yüklerini taşıdığı, çekme mukavemetinin ise sıfır olduğu kabul edilir.

3) Dış Etkilere Dayanıklılık (Durabilite), sertleşmiş beton özeliğidir. Betonun sahip olduğu özellikleri zaman içinde ve dış etkiler karşısında kaybetmemesi anlamına gelir. Beton bileşimi, bu üç özeliği belirleyen ana etmendir.

2.2. BETONDA DAYANIKLILIK (DURABİLİTE)

Baradan ve diğ. [3] durabiliteyi, yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini uzun yıllar boyu bozulmadan yerine getirebilmeleri olarak tanımlamaktadır.

Bir yapının projelendirilmesi ve yapımı, dayanım, dayanıklılık, işlevsellik, ekonomi, estetik, amaca uygunluk ve imalat süresi ilkelerinin birlikte ele alındığı bir optimizasyon problemi olarak tanımlanabilir. Yani yapının planlanan hizmet ömrü süresince dıştan ve içten kaynaklanan yıpratıcı etkilere karşı dayanıklı (kalıcı) olması gerekmektedir.

Yapay bir malzeme olan betonarmenin yararlı özelliklerini sürdürebilmesi kalıcı olmasına bağlıdır. Yapıların kalıcı olması yalnızca doğru taşıyıcı sistemin seçimi, projelendirilmesi ve yapımı ile kısıtlı değildir. Aynı zamanda, yapının belirli zaman sürecinde “kalıcı” denecek kadar uzun ömürlü olmasını sağlayacak önlemler alınmalı ve en az bakımı gerektirecek şekilde yaşlanması da yavaşlatılmalıdır.

Beton bünyesinde veya hemen yakın çevresinde (mikroklim); sıcaklık, nem ve kimyasal maddelerin taşınım mekanizması ve bunları etkileyen parametreler betonun kalıcılığını etkiler.

Mekanik yollar dışındaki bozulma süreçlerini kontrol eden ana etmen su veya nemin varlığıdır. Su beton içine zararlı maddeleri taşır, ayrıca kimyasal reaksiyonların oluşumuna katkıda bulunur. Suyun beton içinde taşınımı, beton içerisindeki boşlukların türüne, çapına, dağılımına ve mikro veya makro boyuttaki çatlakların varlığına bağlıdır. Bu nedenle beton bünyesinde boşlukların dağılımının kontrol edilmesi ve çatlakların oluşumunun engellenmesi kalıcılığın sağlanması için gereklidir.

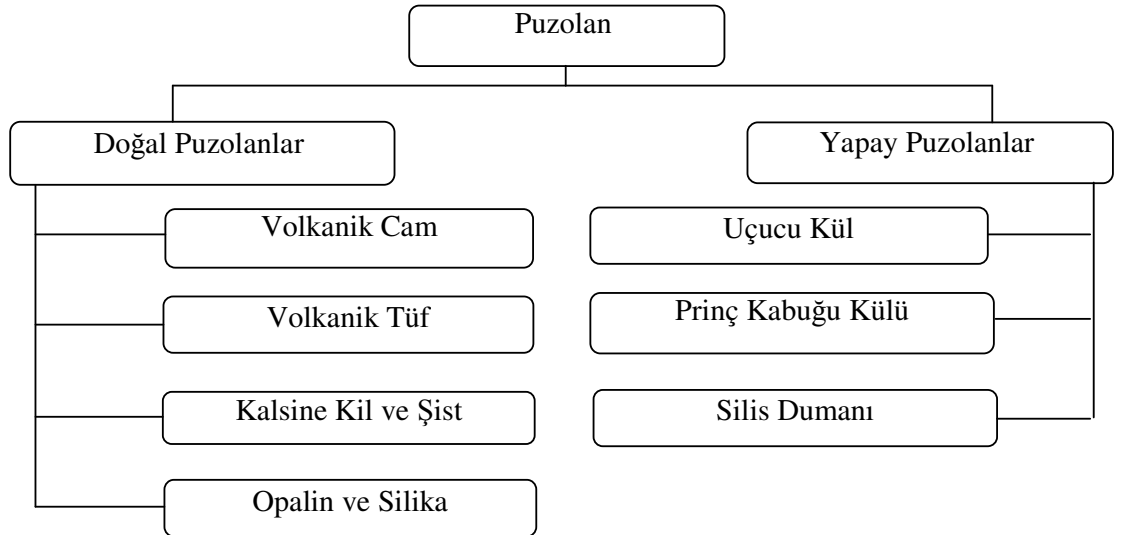
Beton elemanların zamanla bozulmalarına çeşitli iç veya dış etkenler neden olur. Bu etkenler fiziksel, kimyasal, biyolojik veya mekanik kökenli olabilir. Dış etkiler arasında; sülfat etkisi, donma-çözülme, aşınma, karbonatlaşma, asit ve tuz etkileri sayılabilir. Hasarın şiddeti bu dış etkilerin derecesi ve betonun kalitesine bağlı olarak değişmektedir. İç etkiler arasında; alkali-agrega reaksiyonu, gecikmiş etrenjit oluşumu

(DEF), agrega ve sertleşmiş çimento hamurunun termal özellikleri arasındaki farklılıklar gibi etkiler sayılabilir. Betona karışımın aşamasında katılan mineral katkıları ile betonun kalıcılık özelliğinin iyileştirilmesi mümkün olabilmektedir.

2.3. BETONA KATILAN MİNERAL KATKILAR

Mehta [1], bu yüzyılın başlarından itibaren puzolanlı (veya katkı) çimentoların önemli derecede ilgi gördüğünü belirtmektedir. TS EN 197-1 [6] de puzolan özellikleri şöyle tanımlanmaktadır; puzolanlar, silisi ve alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal maddelerdir. Su ile karşılaştığında kendi kendine sertleşmezler fakat ince öğütüldüklerinde ve suyun bulunduğu ortamlarda normal çevre sıcaklığında çözülmüş kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dayanımı geliştiren kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat hidrat bileşiklerini oluşturmak üzere reaksiyona girerler. Esasen reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitlerdir. Reaktif SiO_2 miktarı kütlece %25'den az olmamalıdır.

Yapılan çalışmalarda [1, 7, 8, 9] puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal ve yapay olarak iki grupta sınıflandırılabilirler (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Puzolanların Sınıflandırılması [1, 7, 8, 9]

2.3.1. Doğal Puzolanlar

Çelik [10]'e göre, doğal puzolanlar, genellikle uygun kimyasal ve mineralojik bileşimli volkanik maddeler veya tortul kayalardır. Doğal kalsine edilmiş puzolanlar ise, volkanik orijinli malzemelerin, killerin, şistlerin ve tortul kayaların ısı ile aktifleştirilmesi sonucu meydana gelmektedirler.

Pişmiş şist, özellikle pişmiş yağlı şist özel bir fırında yaklaşık 800 °C sıcaklıkta üretilir. Doğal maddenin bileşimi ve üretim prosesi nedeniyle pişmiş şist esas olarak dikalsiyum silikat ve mono kalsiyum alüminat olmak üzere klinker fazlarını ihtiva eder. Aynı zamanda az miktarda serbest kalsiyum oksit ve kalsiyum sülfatın yanında özellikle silisyum dioksit olmak üzere daha yüksek oranlarda, puzolanik reaksiyona giren oksitleri ihtiva eder. Buna göre ince öğütülmüş pişmiş şist, puzolanik özelliklere ilave olarak, Portland çimentosunun belirgin özelliklerini de gösterir.

2.3.2. Yapay Puzolanlar

2.3.2.1. Uçucu Kül

Bu çalışmanın konusu olması nedeni ile uçucu kül, Bölüm 2.4 te ayrıntılı olarak verilmiştir.

2.3.2.2. Silis Dumanı

Yeğınobalı [12] silis dumanını şöyle tanımlamaktadır; silisyum metalinin veya alaşımlarının elde edilmesi için yüksek saflıktaki kuvars elektrik fırınlarında yaklaşık 2000 °C sıcaklıkta kömürle indirgeme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu işlem esnasında büyük bir miktarı SiO'dan oluşan gaz oluşmaktadır. SiO'nun, fırının nispeten soğuk kısmında havadaki oksijenle oksitlenmesi sonucunda, camsı yapıdaki SiO₂ parçacıkları oluşmaktadır. Bu parçacıklar fiber filtrelerden geçirildikten sonra yoğunlaştırılmış silis dumanı elde edilmektedir.

2.3.2.3. Pirinç Kabuğu Külü

Mazlum [13]'a göre, pirinç kabuğu, çeltik üretimi sonunda elde edilen zirai ürün atığıdır. Pirinç kabuğunun yapısındaki SiO₂, kabuklar yandıktan sonra elde edilen kül hızlı bir şekilde soğutulursa amorf, yavaş bir şekilde soğutulursa kristal SiO₂ oluşur. Amorf şekilde özgül yüzeyi büyük değerler alır. Dolayısıyla puzolanik aktivitesi yüksektir.

Yüksek Fırın Cürufunu, Tokyay ve Erdoğan [11] çalışmalarında şöyle tanımlamaktadır: Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen yüksek fırın cürufu (YFC) yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde yer alır. Demir filizi, kok ve kireç taşının yüksek fırında pişme sonrası atıkları yüksek fırın cürufunu meydana getirirler. Granüle yüksek fırın cürufu, ergimiş cürufun hızla soğutulması ile elde edilir, kütlece en az 2/3 oranında camsı cüruf ihtiva eder ve uygun şekilde aktifleştirildiğinde hidrolik özellikler gösterir.

Granüle yüksek fırın cürufunun kütlece en az 2/3'ü, kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO) ve silisyum dioksit (SiO₂) toplamından ibaret olmalıdır. Geri kalan kısmı az miktarda diğer bileşiklerle birlikte alüminyum oksit (Al₂O₃) ihtiva eder. Kütlece (CaO + MgO) / (SiO₂) oranı 1,0'den fazla olmalıdır.

2.4. UÇUCU KÜL

2.4.1. Uçucu Külün Tanımı ve Tarihçesi

Yapılan çalışmalarda [14, 15, 16, 17, 18] genel olarak uçucu kül şöyle tanımlanmaktadır: Birçok termik santralde, elektrik üretimi için gerekli enerjiyi sağlayabilmek amacıyla, yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır. Dolayısıyla atık malzeme olarak değişik karakterlerde küller elde edilmektedir. Pulverize kömürün yanması ile ortaya çıkan küllerin bir kısmı ocak tabanında birikirken yaklaşık %75-80'i gazlarla birlikte bacadan dışarıya sürüklenmektedir. Bu küllere “uçucu kül” ya da “pulverize yakıt külü” denilmektedir.

Uçucu kül betonda mineral katkı olarak kullanılan yapay bir puzolandır ve çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı olmadıkları halde, sulu ortamda sönmüş kireçle hidratasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşirler.

1970 yılına kadar betonda kullanılan mineral katkıların, kullanım nedeni sadece ekonomik ve ekolojik nedenlerden dolayı olmaktadır. Betona olan yararlı etkisi henüz keşfedilmemişti. Dünyada 1970'li yıllarda başlayan petrol krizinin ardından enerji kullanımını azaltmaya ve alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir. Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri

incelendiğinde, bunların inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabilceği ve dolayısıyla bir yandan malzeme ve enerji üretiminde ekonomi sağlanırken diğer taraftan çevre kirliliğinin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunması da sağlanmış olur.

2.4.2. Uçucu Kül Eldesi

Neville [19] uçucu kül eldesini şöyle açıklamaktadır: Elektrik enerjisi, kömüre dayalı termik santrallerden ve hidroelektrik santrallerinden elde edilmektedir. Son yıllarda bunlara üçüncü olarak doğalgaz santralleri de katılmıştır. Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan ve uçabilen bu küllere, uçucu kül adı verilmektedir. Daha iri taneli olan ve baca gazları ile birlikte atmosfere sürüklenemeyerek kazan tabanına düşen küllere de Mehta [20] taban külü adını vermektedir.

Kocataşkın [16], gelişen teknoloji ile beraber enerji kullanımının giderek arttığını vurgulamaktadır. Bu nedenle endüstriyel atıklardan olan uçucu kül miktarı her geçen gün artmaktadır. Termik santrallerde büyük miktarlarda toplanan uçucu kül çevreye zarar verdiği gibi toplanması halinde depolama ve yok edilmesi ekonomik olmamaktadır.

Tokyay ve Erdoğan [21], Türkiye’de halen sadece kömür ile çalışan 15 tane termik santralin faaliyet gösterdiğini belirtmektedir. Aruntaş [18] çalışmasında şu bilgileri vermektedir: Çatalağzı, Çolakoğlu ve Sugözü-İskenderun termik santrali haricindeki bütün santraller, linyit kömürü ile çalışmaktadır. Türkiye’de elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının üretildiği termik santrallerde 55 milyon ton/yıl düşük kalorili linyit kömürü yakılmakta ve bunun sonucunda da bacalardan 1993 yılı verilerine göre 13,5 milyon ton/yıl, 1998 yılı verilerine göre ise yaklaşık 13 milyon ton/yıl uçucu kül elde edilmektedir. Bu miktar, A.B.D.’de 45 milyon ton/yıl ve Hindistan’da 50 milyon ton/yıl dolayındadır. Bütün Dünyada bir yılda üretilen toplam uçucu külün ancak %25’den daha azı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte Almanya, Hollanda ve Belçika’da üretilen toplam uçucu külün %95’den fazlası kullanılmaktadır. Diğer taraftan büyük miktarlarda uçucu kül üretilen A.B.D. ve Çin’de sırasıyla yaklaşık %32 ve %40

oranında uçucu kül kullanıldığı görülmektedir. 1990 yılı verilerine göre Türkiye’de uçucu kül kullanım oranı, %1’den daha azdır.

2.4.3. Uçucu Kül Özellikleri

2.4.3.1. Fiziksel Özellikleri

Yapılan çalışmalarda [22, 23], uçucu külün beton içindeki performansını etkileyen en önemli özeliği inceliğidir. Uçucu küllü betonların dayanım, aşınma direnci, donma-çözülme direnci gibi özelliklerin kullanılan uçucu külün inceliğinin bir fonksiyonu olduğu anlaşılmıştır. Uçucu küllerin çoğunluğu 45 μm ’den küçük tane boyutuna sahip olmakla birlikte, uçucu kül tane boyutu aralığının 1 mikronun altından, 150 mikronun üstüne çıkabildiği kabul edilmektedir. Bir termik santralin kullanılan kömür kaynağında kömür işleme, öğütme ve yakma tekniklerinde önemli değişiklikler olmadığı takdirde o termik santralden elde edilen uçucu külün inceliği de hemen hemen sabit olur. Genel olarak, puzolan olarak betonda kullanılacak uçucu külün kullanıma uygunluğu, taneciklerinin yüzde olarak belirli bir çoğunluğunun 45 mikronluk elek üstünde kalması kabul edilebilecek maksimum miktar için standart değerler yüzde olarak Almanya’da 50, Avustralya’da 50, Amerika’da 34, Kanada’da 34, Japonya’da 25, İspanya’da 14, İngiltere’de 12,5’tir.

Yine mevcut çalışmalarda [21, 22, 24, 25] uçucu külün aşağıdaki fiziksel özelliklerinden bahsedilmektedir: Genel olarak termik santralde yakılan kömürün özelliklerine ve yanma sistemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uçucu kül, genellikle gri renktedir ve içindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça rengi koyulaşır. Uçucu kül, %60–90 camsı bileşen ihtiva eden çok ince taneciklerden meydana gelmektedir. Uçucu külün tane şekli, yuvarlaktır ve çapları, 1–200 μm arasında değişir. Taneciklerin yaklaşık %75’inin çapı 45 μm ’den, %50’den çoğu ise 20 μm ’den daha küçüktür. Yoğunluğu, 2,2–2,7 g/cm^3 dolayındadır. Özgül yüzeyi, çimento inceliğine yakın olup öğütme yapılmadan kullanılabilceğini göstermektedir. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri Tablo 2.1 de özetlenmiştir.

Tablo 2.1 : Uçucu küllerin fiziksel özellikleri [25]

Çap (μm)	Şekil	Renk	Yoğunluk (g/cm^3)	İncelik
1– 200	Yuvarlak	Gri	2,2 – 2,7	~Çimento inceliğinde

2.4.3.2. Kimyasal Özellikleri

Yapılan çalışmalarda [21, 25, 26] uçucu külün kimyasal özellikleri şöyle açıklanmaktadır: Uçucu küllerde S+A+F toplamının, genellikle %70 değerinden fazla olduğu ve ASTM C 618'deki şartın sağlandığı görülmektedir. Kullanılan kömür cinsine bağlı olarak bazı uçucu küllerde önemli oranda CaO bulunmaktadır. CaO miktarı %10'un altında olan uçucu küller, düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu, %10'un üstünde olanlar ise yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu uçucu kül olarak adlandırılmaktadır.

ASTM C 618 [26]'e göre uçucu küller, S+A+F toplamı %70'in üzerinde ise F sınıfı uçucu kül, S+A+F toplamı %50'nin üzerinde ise C sınıfı uçucu kül olarak gruplandırılmaktadır. Türkiye'de elde edilen bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları, TS 639 ve ASTM C 618 sınır değerleri ile birlikte Tablo 2.2 de verilmiştir. Afşin-Elbistan uçucu külü dışında diğerlerinin genel olarak TS 639'da belirtilen sınır değerlere uygun olduğu, ASTM C 618 [26]'e göre ise Afşin-Elbistan uçucu külünün C sınıfı, diğer uçucu küllerin F sınıfı olduğu görülmektedir.

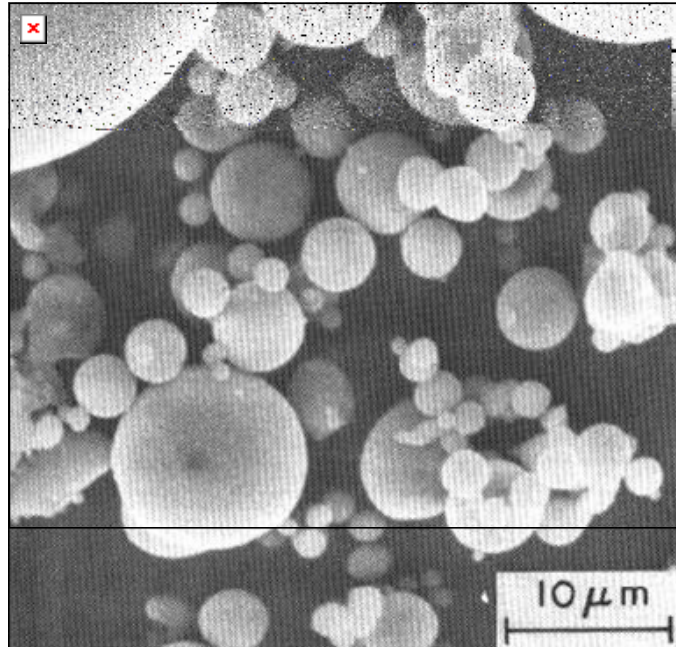
Tablo 2.2 : Türkiye'deki bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları [21, 25, 26]

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TS 639	ASTM C618	ASTM C618
						F	C
SiO ₂	27,4	56,8	58,59	49,13	-	-	-
Al ₂ O ₃	12,8	24,1	21,89	15,04	-	-	-
Fe ₂ O ₃	5,5	6,8	9,31	8,25	-	-	-
S+A+F	45,7	87,70	89,79	72,42	>70	>70	>50
CaO	47,0	1,4	4,43	13,2	-	-	-
MgO	2,5	2,4	1,41	4,76	<5	<5	<5
Na ₂ O	(N+K) 0,3	(N+K) 3,0	0,24	2,2	-	<1,5	<1,5
K ₂ O	-	-	1,81	1,76	-	-	-
SO ₃	6,2	2,9	0,41	3,84	<5	<5	<5
K.K	2,4	0,6	1,39	0,72	<10	<12	<6

Postacıoğlu [27], uçucu kül katkısının kimyasal bileşimleri ve oranlarını şu şekilde belirtmektedir: SiO_2 (%42–50), Fe_2O_3 (%5–10), Al_2O_3 (%16–30), CaO (%2–4), MgO (%0,5–9), diğer maddeler (%4–10) dir.

2.4.3.3. Mineralojik Yapısı

Mehta, Tokyay ve Erdoğdu [20, 21] çalışmalarında uçucu küllerin mineralojik yapısını şöyle açıklamıştır: Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden daha çok mineralojik yapıları ile ilişkilidir. Düşük kireçli uçucu küllerin ana aktif bileşeni, silika ve aluminadan oluşan amorf ya da camsı fazdır. Bu tip uçucu küller, rutubetli ortamda sönmüş kireç (CaOH_2) ile reaksiyona girdikleri için puzolanik özeliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise, hem puzolanik özellik gösterirler hem de sahip oldukları serbest kireç, trikalsiyum aluminat, amorf silis ve alumina vb. sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özeliğe sahip olabilirler. Tipik bir F sınıfı uçucu külün SEM (Scanning Electron Micrograph)'deki görüntüsü Şekil 2.2 de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi uçucu kül tanecikleri, yuvarlak bir şekle sahiptir.



Şekil 2.2 : Tipik bir F sınıfı uçucu külün SEM'deki görüntüsü [20]

Tokyay [25]'a göre, düşük kireçli uçucu küllerdeki camsı faz miktarı, yüksek kireçli uçucu küllerden daha fazladır. Düşük kireçli uçucu küllerde mineral faz olarak; camsı faz, mullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_2O_4), kuvarz (SiO_2) vb. var iken

yüksek kireçli uçucu küllerde sayılanlara ek olarak serbest kireç (CaO), anhidrit (CaSO₄), trikalsiyum aluminat (C₃A), plajiyoklaz, gehlenit, feldspat gibi kalsiyum silikatlar bulunmaktadır. Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları Tablo 2.3 te verilmektedir.

Tablo 2.3 : Türkiye'deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları [25]

Mineral, %	Uçucu Kül					
	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1,0	18,1	1,2	4,3	8,8	6,0
Kuvarz	4,5	10,9	5,6	5,1	13,9	22,4
Manyetit	0,8	0,2	2,5	0,6	4,1	2,9
Hematit	4,0	0,1	6,0	2,0	3,0	7,0
Anhidrit	12,2	-	9,3	7,4	-	-
Serbest CaO	18,6	0,7	5,5	9,8	0,9	1,0
Plajiyoklaz	~28	-	~15	~20	-	~25
Camsı ve amorf faz	~30	~70	~50	~50	~70	~35

2.4.4. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Topçu ve Canbaz [28]'a göre, farklı elektrik santrallerinden alınan uçucu küllerle yapılan bir çalışmada, uçucu küllerin kimyasal, mineralojik yapıları ile hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlarının oluşumu ve hızları bakımından birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda [29, 30] sınıflandırma için şu etmenler belirtilmektedir: Türkiye'de açığa çıkan uçucu küllerin büyük bölümü yüksek kireç içeriklidir ve uçucu kül özellikleri santralden santrale, hatta aynı santralde zamana bağlı olarak büyük değişiklikler gösterebilmektedir. Son yıllarda İzmir yöresindeki birçok çimento fabrikası ve hazır beton tesisi Soma Termik Santraline ait uçucu külü kullanmaktadır. Buna karşılık betonda yüksek oranda uçucu kül kullanımı, silindirle sıkıştırılmış bazı beton uygulamaları dışında ülkemiz açısından nispeten yeni bir konudur.

Diğer çalışmalara göre [3, 30], uçucu kül puzolanik özeliği olan ve betonun birçok özeliğini olumlu etkileyen değerli bir beton katkısıdır. Genellikle F sınıfı uçucu kül küresel yapısı nedeniyle betonun işlenebilme özeliğini iyileştirmekte, taze betonda su kumayı (terleme) azaltmakta, betonun hidrasyon ısını azaltarak sıcak havalarda kütle betonu dökümüne imkân tanımakta, puzolanik reaksiyon sayesinde betonun uzun dönemli mukavemetine katkıda bulunmakta, betonun geçirimliliğini azaltmakta ve betonun iç ve dış kaynaklı yıpratıcı etkilere dayanıklılığını arttırmaktadır. Bu yararlı özellikleri uçucu külün beton üretiminde yaygın olarak kullanımına ve araştırmaların bu konu üzerinde yoğunlaşmasına yol açmıştır. Buna karşılık, uçucu kül betonun erken dayanımını düşürebilmekte ve özellikle yüksek kireç içerikli (C sınıfı) uçucu külün betonda yüksek oranda kullanımı ise betonun hacim sabitliğinin bozulmasına yol açabilmektedir.

Yazıcı [31]'ya göre, betonda yüksek oranda C sınıfı uçucu kül kullanımı erken dayanımları önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak, betonun diğer fiziksel ve kimyasal etkiler altındaki uzun dönemli performansının gözlenmesi yararlı olacaktır.

Tokyay ve Erdoğan [21] ise konuya şöyle açıklama getirmektedir: Düşük kireçli uçucu küllerdeki ana aktif bileşen silika ve alüminadan oluşan amorf veya camsı fazdır. Bu tür uçucu küller rutubetli ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliklere sahip bileşenler meydana getirirler. Diğer bir deyişle, düşük kireçli uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise puzolanik özellik gösterirken, içerdikleri serbest kireç, anhidrit, C_3A , amorf silika ve amorf alümina v.b nedeniyle de kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler.

Aruntaş [18]'a göre, uçucu küller, kimyasal kompozisyonlarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Uçucu küller, içerdği CaO miktarı bakımından;

- 1) CaO miktarı %10'dan az olanlara düşük kireçli/kalsiyumlu uçucu kül,
- 2) CaO miktarı %10'dan fazla olanlara yüksek kireçli/kalsiyumlu uçucu kül, olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Uçucu kül, yapısındaki kireç ve SO_3 miktarına göre ise üç grupta toplanmaktadır. Bunlar;

- 1) Esas yapısı siliko alüminatlardan meydana gelen, $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ (S+A+F) toplamı %70'in üzerinde olan ve genellikle taşkömüründen elde edilen siliko alüminalı uçucu kül,
- 2) Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı %50 ile %70 arasında olan ve kireç ile silika miktarı yüksek olan siliko kalsik uçucu kül,
- 3) Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı %50'in üzerinde olan ve diğerlerine göre daha fazla SO_3 ve CaO ihtiva eden sülfü kalsik uçucu küllerdir.

Uçucu küller, ASTM C 618 [26]'e göre de iki başlık altında toplanmaktadır. Bunlar sırasıyla,

- 1) bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı %70'in üzerinde olan F sınıfı uçucu kül,
- 2) genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı %50'in üzerinde olan C sınıfı uçucu küllerdir.

Yukarıda belirtilen siliko alüminalı uçucu kül, F sınıfındadır. Siliko kalsik uçucu küllerin bazıları F sınıfı içinde, bazıları da C sınıfı içinde yer almaktadır. Sülfü kalsik uçucu küllerin çoğu, C sınıfı uçucu kül olarak isimlendirilmektedir. Diğer bir sınıflandırma, ENV 197-1'e göre yapılmakta ve uçucu kül, iki kategoriye ayrılmaktadır. Buna göre uçucu küllü çimentolarda kullanılacak olan uçucu küller, silisli ve kalkerli uçucu küller olarak sınıflandırılmıştır.

Silissi uçucu kül, çoğunlukla puzolanik özelliklere sahip küresel partiküllerden ibaret ince bir toz olup, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşur. Geri kalan kısım ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler ihtiva

eder. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir.

Kalkersi uçucu kül, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif kalsiyum oksit (CaO), reaktif silisyum dioksit (SiO₂) ve alüminyum oksit (Al₂O₃)'den oluşur. Geri kalan kısım ise demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşikler ihtiva eder. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir.

2.4.5. Uçucu Külün Kullanım Alanları

Türkiye'de uçucu kül kullanımına ait detaylı veriler bulunmamakla birlikte 2002 verilerine göre yıllık uçucu kül üretimi 15 milyon ton civarındadır. Aruntaş [18] uçucu külün genellikle çimento ve tuğla üretimi ile baraj yapımında kullanıldığını belirtmektedir. Tokyay [25], Türkiye ve Dünyada uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanları Tablo 2.4 te özetlemektedir.

Tablo 2.4 : Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanlar [25]

Malzeme	Kullanım amacı / yeri
Çimento	Hammadde, katkı ve ikame malzemesi olarak
Agrega	İnce agrega, iri agrega ve hafif agrega olarak
Beton	Katkı ve ikame malzemesi olarak
Tuğla, ateş tuğlası	Katkı malzemesi olarak
Kerpiç	Bağlayıcı malzeme olarak
Yapı malzemeleri	Blok, panel, duvar, gaz beton, beton boru, cam, boya, seramik, plastik, harç
Çeşitli yapılar / uygulamalar	Baraj, otoyol, nükleer santral, geoteknik uygulamalar

2.4.5.1. Çimentoda Kullanımı

Aruntaş [18]'a göre, inşaat sektöründe uçucu külün yaygın olarak kullanıldığı alanların başında çimento sanayisi gelmektedir. 1980'li yıllardan itibaren Türkiye'de katkılı çimentoların çimento üretimindeki payı, %90'ların üstüne çıkmıştır. Uçucu küllerin çimentoda; 1) hammadde, 2) katkı maddesi, 3) ikame malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir. Uçucu kül, çimentonun ana hammaddeleri olan kil ve kalkere hammadde olarak karıştırılarak klinker üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu kül

çimentoda katkı olarak kullanıldığında enerji tasarrufu sağlanmakta ve daha ucuz çimento elde edilmektedir. Yine uçucu külün, ikame malzemesi olarak çimentoda kullanılması durumunda da ekonomi sağlanmaktadır. Türkiye’deki uçucu küller ile ilgili olarak yapılan deneysel bir çalışmada, Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Orhaneli, Soma ve Tunçbilek uçucu küllerine ait özgül yüzey değerleri, çimento standartlarında aranan en az 280 m²/kg değerinden büyük veya yaklaşık eşit olarak bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar, uçucu küllerin öğütme işlemi yapılmadan doğrudan çimento üretiminde veya üretim sonrası ikame metodu ile çimentonun bir bölümü yerine kullanılabilceğini göstermektedir. Öte yandan çimento üretimi sırasında doğal hammadde ve enerji tüketimi ile atmosfere CO₂ gazı çıkmaktadır. Bu da sera etkisi yaparak iklim değişikliklerine neden olmaktadır. Bu yüzden çimento üretiminde uçucu kül kullanılması ile doğal çevrenin bozulması ve enerji tüketimi azalacağı gibi havadaki CO₂ miktarı da azalacağı için küresel ısınmanın azalmasında yararlı olacağı görülmektedir. Bu durumda enerji tasarrufu sağlandığından çimento maliyetinin de azalması söz konusudur.

Türkiye’de ve Dünyada uçucu küllü çimentolar ve bu çimentoların özellikleri belirtilmiştir. Türkiye’de 1980 yılına kadar çimento üretiminde kullanılan toplam uçucu kül miktarı, yaklaşık olarak 40.000 tondur. İtalya’da elde edilen uçucu külün ancak %1’i çimento üretiminde kullanılırken, Fransa’da 4 milyon ton/yıl dolayında uçucu kül elde edilmekte ve bunun %25’i çimento üretiminde kullanılmaktadır. A.B.D.’de ise üretilen uçucu külün yaklaşık %25’i çimento ve betonda değerlendirilmektedir. Çin’de uçucu kül-kireç karışımları, yaklaşık 50 yıldan beri duvar çimentosu olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmalara [27, 28, 32] göre, uçucu kül katkısı beton üretiminde iki şekilde kullanılmaktadır. Birinci yöntemde puzolan, belirli oranda uçucu kül içeren katkılı çimento kullanımıyla betona katılmaktadır ve bu yöntem “birlikte öğütme tekniği” adıyla ifade edilmektedir. İkinci yöntem ise uçucu külün betona karıştırma sırasında çimentoya ilave ya da ikame olarak katılmasıdır ve “ayrı öğütme tekniği” olarak isimlendirilmektedir. Böylece Katkılı Portland Çimentosu elde edilir. Puzolanların serbest kireci tespit etmesi çimento yönünden önemlidir.

Uçucu kül katkısının çimento üretimi sırasında katılması durumunda çimentonun öğütülme işlemi kolaylaştırmakta ve öğütülme süresi kısaltmakta yani daha az enerji ile daha dayanımlı çimento elde edilmektedir [28].

2.4.5.2. *Agrega Olarak Kullanımı*

Aruntaş [18], agrega olarak uçucu kül kullanımını şöyle açıklamaktadır: Uçucu külün agrega olarak beton ve harç içinde kullanıldığı uzun zamandan beri bilinmektedir. Uçucu kül; Türk, Amerikan ve İngiliz standartlarında beton ve duvar elemanları için yapay hafif agrega olarak kabul edilmektedir. Betonda uçucu kül kullanımı; 1) ince agrega, 2) sinterleme sonrası yapay hafif agrega ve 3) uçucu kül ile bir miktar portland çimentosu karıştırılarak elde edilen iri hafif agrega olmak üzere üç şekilde yapılmaktadır. Ülkemizde yapılan bir çalışmada, sinterlenmiş uçucu kül hafif agregası üretimi laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiş ve bu malzemenin inşaat sektöründe başta agrega olmak üzere birçok alanda kullanılabilmesi önerilmiştir. Sinterlenmiş uçucu kül hafif agregasının geleneksel agrega yerine betonda içi dolu veya boş blok üretimi için kullanılabilmesi ve çok katlı binalarda ölü yükü azaltacağı belirtilmektedir. Uçucu külün agrega olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar, özellikle son yıllarda hız kazanmıştır. Beton karışımına ince agreganın bir kısmı yerine uçucu kül kullanılarak yapılan çalışmalarda olumlu sonuçlar elde edilmiş ve uçucu külün ince agreganın bir bölümü yerine kullanılabilmesi tespit edilmiştir.

Yüksek sıcaklıkta sinterlenerek yapay iri hafif agrega olarak üretilen uçucu kül, hafif beton yapımında kullanılmıştır. Yüksek oranda uçucu kül ile bir miktar portland çimentosu karıştırılarak elde edilen iri hafif agregaların, hafif beton üretiminde kullanıldığı ve taşıyıcı betonlar elde edildiği görülmüştür. Uçucu kül, kil ile birlikte yapay agrega olarak üretilmiş ve betonda, yıkıntı atığı ile birlikte başarıyla kullanılmıştır. Öte yandan uçucu külün bir dizi işlem sonrası beton içinde tekrar kullanılan agrega (geri dönüşümlü agrega) olarak kullanıldığında, doğal agrega kullanılarak üretilen beton ile atık agrega içeren betonda benzer sonuçlar elde edilmiştir. İngiltere’de inşa edilen nükleer bir santral inşaatında 1.300 ton sinterlenmiş uçucu kül, hafif agrega olarak beton içinde kullanılmıştır.

2.4.5.3. *Betonda Kullanımı*

Aruntaş [18], betonda uçucu kül kullanımını şu şekilde tanımlamaktadır: Uçucu külün çimento ile birlikte inşaat sektöründe en çok kullanıldığı diğer bir alan, beton üretimidir.

Uçucu kül, hem normal ve hafif betonda hem de giderek kullanımı yaygınlaşan hazır beton üretiminde gerek katkı gerekse ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bundan başka uçucu kül, ön üretim ve ön gerilmeli beton elemanların yapımında da kullanılmaktadır. Diğer taraftan uçucu külün, betonda su tutucu katkı maddesi olarak da kullanılabileceği önerilmektedir. Dünyada uçucu külün inşaat sektöründe kullanımı ile ilgili çalışmalar, genellikle beton üzerinde yoğunlaşmaktadır. Beton karışımında uçucu kül kullanıldığında, betonun hem dayanım hem de dayanıklılığında artışlar elde edilmektedir. Çayırhan ve Soma-B uçucu külleri, çimentonun bir kısmı yerine ikame malzemesi olarak normal betonda kullanıldığında basınç dayanımı artışı sağlanmıştır. Betonda yüksek oranda uçucu kül katkısı kullanıldığında basınç dayanımı artarken aşınma dayanımlarının da arttığı gözlenmiştir. Benzer şekilde hafif betonlarda uçucu külün çimento ile ikame edildiği durumda da dayanım artışı elde edilmiştir. Yüksek miktarda C sınıfı uçucu kül kullanıldığında, daha iyi kalitede ve düşük maliyetli beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Dördüncü eleman olarak yüksek miktarda uçucu külün betondaki performansı uzun süreli olarak incelendiğinde, uçucu külün taşıyıcı beton uygulamaları ile sülfat ve klorür etkisine maruz kalan ortamlarda kullanılabileceğini göstermiştir. Öte yandan uçucu külün polimer beton üretiminde de kullanılabileceği tespit edilmiştir. Beton karışımında hafif iri agrega olarak sinterlenmiş uçucu kül kullanıldığında, betonarme kirişler üretilmiş ve kirişler üzerinde uygun sonuçlar elde edilmiştir. Uçucu külün olumlu bir etkisi de betonarme çeliği üzerinedir. Beton karışımında uçucu kül kullanılması durumunda betonarmeye donatı korozyonunun azaldığı belirlenmiştir.

Uçucu külün kullanıldığı diğer bir beton çeşidi lifli betondur. Otoklav uygulanmış lifli beton üretiminde ve kendiliğinden yerleşen lifli beton yapımında yüksek oranda uçucu kül kullanılabileceği önerilmektedir.

Topçu ve Canbaz [28] şu eklemeyi yapmaktadır: Baraj gibi kütle betonu dökülen yapılarda hidrasyon ısısı düşük çimento ve geçirimsiz betonların tercih edilmesi ve uçucu kül çimento yerine kullanılması hidrasyon ısısını ve betonun kompasitesini iyileştirmesi nedeni ile DSİ ve TCK gibi kuruluşlar uçucu küllü betonun kullanılmasına öncülük etmişlerdir. Uçucu kül, betonun hidrasyon ısısını düşürmek amacıyla Türkiye’de ve Dünyada birçok barajın yapımında da kullanılmıştır. A.B.D.’de 1953

yılında tamamlanan Hungry Horse barajının kütle betonunda 120.000 ton uçucu kül kullanılmıştır. Bundan başka silindirle sıkıştırılmış beton (rolkrit) çok sayıda baraj, beton karışımlarına uçucu kül katılarak inşa edilmiştir. İngiltere’de nükleer bir enerji santrali inşaatında kullanılan betonda yaklaşık olarak 100.000 ton uçucu külün katkı malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir. Sıcak havalarda beton dökümünde, taşıyıcı özellikten çok dayanıklılık özeliğinin ön planda tutulduğu deniz yapısı vb. yapılar için tavsiye edilebilir. Ancak bu tür betonun uzun süre ıslak küre olan ihtiyacı göz önünde bulundurulmalıdır [3].

2.4.5.4. Kerpiç Yapımında Kullanımı

Bilindiği gibi kerpiç yapımında, killi toprak ile lif olarak saman kullanılmaktadır. Baradan [33]’a göre, kerpiç, dayanımı düşük ve suya karşı da dayanıksız olan geleneksel bir yapı malzemesidir. Kerpice dayanımını ve dayanıklılığını artırmaya yönelik çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. Kerpice bağlayıcı olarak alçı katılmış ve elde edilen bu malzemeye alker adı verilmiştir. Alçı, Alker’in fiziksel ve mekanik özelliklerini, normal kerpice göre önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bundan başka, kerpiç üretiminde uçucu külün kullanıldığı bazı araştırmalar da yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, uçucu külün kerpiç özelliklerini olumlu yönde etkilediğini, dolayısıyla kerpiç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak uçucu külün kullanılabileceğini göstermektedir.

2.4.5.5. Tuğla Yapımında Kullanımı

Aruntaş [18]’a göre, uçucu kül katkısının diğer bir kullanım alanı ise tuğla üretimidir. Uçucu külün belirli oranlarda çeşitli malzemelerle birlikte tuğla üretiminde kullanılmıştır. Elle çalıştırılan tuğla makinasında uçucu kül, kireç ve kum birlikte tuğla üretiminde kullanılmıştır. Uçucu kül, tuf ve kireç birlikte kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Uçucu külün kireç ile birlikte değişik oranlarda karıştırılarak tuğla yapımında kullanılabileceği önerilmiştir. Hindistan’da yapılan inşaatlarda uçucu kül tuğlası kullanılması uygun görülmektedir. Türkiye’de tuğla üretiminde uçucu kül kullanımı, 1967 yılında başladığı halde daha sonra kesintiye uğramıştır. Ayrıca 1973 ve 1979 yıllarında ateş tuğlası üretiminde uçucu kül kullanıldığı görülmektedir.

2.4.5.6. Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanımı

Uçucu küller, gaz beton, yalıtım malzemesi, duvar, beton boru, harç, cam gibi yapı malzeme ve elemanlarının üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu kül - kireç karışımı, Çin’de 1950’li yıllardan beri blok üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu küller, harç

karişimlerinde da karişımın bir elemanı olarak kullanılmaktadır. Uçucu külün duvar yapımında kullanılan hafif yapı malzemesi, yük taşımayan panel ve blok üretiminde kullanılabileceği belirlenmiştir. Uçucu kül, silis kaynağı olarak gaz beton üretiminde hammaddeye kariştırılarak da kullanılmıştır. Uçucu külün, plastik ve boya üretiminde dolgu olarak da kullanıldığı görölmektedir. Uçucu kül, seramik kaplama malzemesi üretiminde kullanılmış ve üretilen seramiklerin eğilme dayanımları, döşeme seramikleri için standartta belirtilen değerin 6 katı olarak bulunmuştur. Öte yandan uçucu kül, cam yapıcı ana oksitlere sahip olması nedeniyle cam-seramik üretiminde de kullanılmaktadır. Uçucu külden cam ve cam-seramik üretimi başarılı bir şekilde gerçekeştirilmiştir. Uçucu kül, fenol formaldehit reçinesi içinde dolgu maddesi olarak kullanılmış ve suya dayanıklı seramik görünümlü yapı malzemesi üretilmiştir.

Topçu ve Canbaz [28], şu ilaveyi yapmaktadır: Uçucu küllü harçların ısı yalıtımı özellikleri incelenmiş ve uçucu küle %10 oranında katılacak çimento, kireç veya çimento + kireç bağlayıcılarından biri ile yalıtım amaçlı sıvalar yapılabileceği gibi ayrıca uçucu külün sandviç dolgu duvarlarda dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

2.4.5.7. Yol İnşaatlarında Kullanımı

Aruntaş [18], yol inşaatlarında ve geoteknik çalışmalarda, uçucu kül kullanımını şöyle tanımlamaktadır: Uçucu kül, inşaat sektöründe yol yapım çalışmalarında da kullanılmaktadır. Kaplama olarak hem beton hem de asfalt kullanılan otoyolların yapımında uçucu kül kullanılmaktadır. A.B.D.'de 1930'lu yıllarda başladığı konu ile ilgili çalışmalar başlamıştır. İlk defa uçucu kül, 1938 yılında A.B.D.'nin Chicago şehrinde bir yol inşaatında çimentoya kariştırılarak kullanılmıştır. Uçucu külün, yol yapımında temel malzemesi ve asfalt karişımı içinde de mineral dolgu olarak kullanıldığı görölmektedir. Öte yandan uçucu kül, yolun temel ve alt temelinin yapımında kum ve/veya çimentonun bir kısmı yerine de kullanılabilir. Uçucu külün asfalt karişımında ince malzemenin bir kısmının yerine kullanılabileceği belirlenmiştir. Bağlayıcı başka bir malzeme kullanılmadan uçucu kül ve kum karişımından iyi ve ucuz stabilizasyonun elde edilebileceği belirtilmektedir.

2.4.5.8. Geoteknik Çalışmalarda Kullanımı

Geoteknik uygulamalarda uçucu kül, dolgu yapmak, zemin stabilizasyonu sağlamak ve bent yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra uçucu külün, 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. Yol dolgularının yapımında uçucu külün çimento ile birlikte pratik olarak kullanılabilceği belirtilmektedir.

2.4.6. Çimentoda Uçucu Kül Kullanımının Etkileri

Yapılan çalışmalarda [34, 42] çimentodaki uçucu külün etkisini aşağıdaki gibi tanımlamaktadır: Uçucu küllü çimento üretimiyle sağlanacak yararlar; (i) üreticinin yararları, (ii) kullanıcının yararları ve (iii) çevresel yararlar olarak üç ana kategoride toplanır. Çimento sektöründe teknolojik gelişmelerin hemen hemen tamamı enerjinin etkin kullanımına yönelik olmuştur. Ön ısıtıcı, ön kalsinasyonlu sistemlerin geliştirilmesinin yanısıra, en önemli gelişmeler öğütme sistemlerinde olmuştur. Çimento üretiminde kullanılan toplam elektrik enerjisinin %40'ından fazlası öğütme işlemlerinde harcanmaktadır. Bu nedenle, yeni öğütücüler, separatörler, değirmenler tasarlanmış ve kullanılmaya başlanmıştır. Öte yandan, tüm dünyada çimentoda daha fazla mineral katkı kullanılması yönünde artan bir eğilim bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, uçucu küllerin çimentoda kullanılması üreticiler açısından; klinkerizasyon, öğütme, kurutma enerjisinde tasarruf, çevre dostu çabalarının ve faaliyetlerinin bir diğer göstergesi olması, ürün çeşitliliği sağlaması elde edilecek çimentonun üstün özellikleri bakımından yararlı olacaktır.

2.4.6.1. Teknik Etki

Topçu ve Canbaz [28]'a göre, küçük danelerden oluştuğu için uçucu kül katkılı beton daha düzgün yüzeye sahiptir. Birim ağırlıkları düşük olduğu için betonun birim ağırlığının azalmasına sebep olur. Uçucu katkılı betonun hidrasyon ısısı düşük olduğu için termik rötre ve çatlama olmaz dolayısıyla kütle betonları için uygundur. Uçucu küller küresel bir yapıya sahip olduklarından su gereksinimini arttırmazlar ve düşük bir su-çimento oranı ile istenilen işlenebilirlik sağlarlar. Uçucu küller sulu ortamda kireci bağladıkları için betonu dış etkilere daha dayanıklı yapar, su geçirimsizliğini azaltır.

Günümüzde betonun dayanımının yanı sıra dayanıklılığının da önemli olduğu görülmüştür. Bu amaçla daha dayanıklı beton üretmek için betonun rötreten dolayı oluşan mikro çatlaklarının azaltılması, daha az çimento ile yüksek oranda uçucu kül

kullanarak istenilen dayanımların sağlanması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Beton üretiminde yüksek oranda uçucu kül kullanmak betonun dayanım özelliklerini iyileştirdiği gibi ekonomi sağlar ve çevre kirliliğini azaltır.

Yazıcı [31] şu eklemeyi yapmaktadır: Bağlayıcı hamurların priz süreleri uçucu kül oranının artması ile artmaktadır. Ancak, süperakışkanlaştırıcı katkı kullanıldığında, priz süreleri, su/çimento oranı azaldığı için oldukça kısalmaktadır.

2.4.6.1.1. Dayanım

Tokyay ve Erdoğan [42] çalışmalarında uçucu külün dayanıma olan etkisini şu şekilde açıklamaktadır: Uçucu kül kullanılması ile betonun erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımları düşmekte, prizi gecikmektedir.

Uçucu küllü betonlarda kür sıcaklığının artırılması basınç dayanımını iyileştirmiş, birim ağırlıkları düşürmüş ve hacimce su emmelerde artışa neden olmuştur. Kür sıcaklığı 20 °C iken 28. günden sonra, kür sıcaklığı 40 °C iken 7. günden sonra uçucu külün puzolanik reaksiyona başladığı görülmüştür. Uçucu kül ve Portland çimentosu ile üretilen harçlarda erken yaşta basınç dayanımı düşmektedir. Bu harçlarda yüksek miktarlarda uçucu kül kullanıldığında priz sürelerinde gecikme olmakta ve büzülme oranı artmaktadır.

Uçucu kül ile yapılan bir çalışmada, PÇ 32,5 çimentosu, Orhaneli termik santrali külü ve akışkanlaştırıcı kullanarak çeşitli karışımlar hazırlanmış ve sonuçta %20 uçucu kül kullanıldığında kontrol betonuna yakın basınç dayanımları elde edilmiş ve uçucu kül ile birlikte akışkanlaştırıcı da kullanıldığında birim ağırlıklarda azalma meydana gelmiş, akışkanlaştırıcı kullanılmadığında birim ağırlıklar artmıştır. Bir başka çalışmada Afşin Elbistan Termik santrali uçucu kül kullanılmış ve %15 civarında uçucu külün çimento yerine kullanılmasının uygun olacağı belirtilmiştir.

Sıcaklık artışı ile yüksek oranda uçucu kül katılmış betonlarda elastisite modülleri ve basınç dayanımları azalmaktadır. Düşük işlenebilirliği olan betonlarda uçucu kül çimento oranının 0,5 ve üzerine çıkması da basınç dayanımını arttırmaktadır. Çökmesiz ve akışkanlaştırıcı katılmış uçucu kül çimento oranının 0,75 olan betonların dayanıklılığı dış yüzey uygulamaları için yeterlidir.

Tokyay ve Erdoğdu [42], uçucu külün çimento üretimi sırasında %7,5 oranında kullanılmasının betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediğini belirtmektedir.

Uçucu kül kullanımının erken yaşta beton basınç dayanımını azalttığı ve uçucu kül miktarının artırılması durumunda dayanımın daha da geç kazanıldığı anlaşılmıştır [28].

2.4.6.1.2. Dayanıklılık

Topçu ve Canbaz [28], klor geçirgenliği, aşınma dayanımı, donma çözülme gibi dayanıklılık etmenleri incelenen bir çalışmada betonda %15 oranında uçucu kül kullanımının uygun olacağını belirtmektedir. Dayanıklılık etmenleri aşağıda başlıklar halinde verilmektedir.

i) *Sülfatlara Karşı Dayanıklılık*: Mehta [35] çalışmasında, mineral katkıların; betonun geçirgenliğini ve kalsiyum hidroksidi azalttığı, C_3A oranını düşürerek betonun sülfata olan dayanıklılığını arttırdığını saptamıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda portland çimentosuna belirli oranlarda mineral katkıları eklenmesinin betonun sülfat dayanıklılığını arttırdığı anlaşılmıştır.

Irassar ve diğ. [36]; mineral katkılı betonda sülfat etkisini araştırmışlardır. Betonun içerdiği mineral katkıları olarak; uçucu kül, doğal puzolan ve volkanik curuf kullanmışlardır. Hazırladıkları numunelerin bir kısmı atmosferik ortamda sülfat çözeltisinde bekletilmiş, diğer numuneler ise yarısı sülfat yoğunluğu yüksek olan toprağa gömülmüştür. Mineral katkıları %8,5 C_3A içeren portland çimentosu ile belli oranlarla yer değiştirilerek numuneler hazırlanmıştır. Sülfat etkisi; görsellik, ağırlık kaybı, basınç dayanımı ve x-ray analizi ile incelenmiştir. Çalışma sonunda mineral katkı içeren betonların sülfata karşı katkısız olanlara göre daha dayanıklı olduğu bulunmuştur.

Beton ile sülfatların etkileşimi, çimento ve betonun yapısına, çözeltilerin yenilenmesine ve hareketine bağlıdır. Beton ile sülfatlı çözeltiler arasında oluşan reaksiyon ürünlerinin miktarı ve özeliği, sülfata bağlı katyonlara, farklı sülfat karışımlarına, bunların birbirine oranlarına ve miktarlarına bağlıdır. Reaksiyon ürünleri ayrıca, çimentodaki trikalsiyumalüminat (C_3A) miktarına göre değişir. Sülfatların etki mekanizması çok karmaşıktır. Sülfatlı çözeltilerdeki sülfat iyonları, çimentonun hidrasyon ürünü olan CH ile reaksiyona girerek jips (CSH_2) meydana getirir. Oluşan jipsin betondaki hacim artışına ve yumuşamaya olan etkisi sınırlıdır ve her zaman zararlı değildir. Fakat

reaksiyon sonunda oluşan jips çimentodaki C_3A ve bunun hidratasyon ürünü olan C_3AH_6 , C_4AH_{13} , C_4ASH_{12-18} ile Candlot tuzu ($C_4AS_3H_{32}$) oluşturur. Candlot tuzu doğal mineral olan etrinjit'e çok benzer, içerdiği 32 molekül kristal suyu nedeni ile de büyük hacim artışı meydana getirir. Oluşan reaksiyon ürünleri boşlukları doldurur ve erken yaşlarda mekanik özelliklerde iyileşmeye yol açabilir. Reaksiyon ürünlerindeki hacim artışı nedeni ile yapıda ilave çatlaklar oluşur; bu çatlaklar malzemenin performansını düşürür, kırılmalar ve parça atmalar görülür. Kül, çok ince oluşu nedeni ile çimento hamuru-agrega arayüzünü ve kılcal boşlukları tıkar, boşlukların küçülmesine ve kılcal boşlukların kesilmesine neden olur, ürünün mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirir. Bunun sonucu olarak su veya sülfat iyonlarının kütle içine difüzyonu zorlaşır, su ve sülfat etkisine karşı dayanıklılık artar.

Bir kısım Portland çimentosunun belirli bir miktarda puzolan ile ikame edildiği çimento pastalarında toplam gözeneklilik Portland çimentosu içeren kontrol numunelerinden daha fazladır. Bu durumun hem uçucu kül hem de doğal puzolan içeren pastalar için geçerli olduğu tespit edilmiştir.

ii) Alkali Agregata Reaksiyonuna Karşı Dayanıklılık: Betonda kullanılan agregalardaki bazı özel bileşenler, özel şartlar altında, betona çoğu durumda çimentodan geçen alkalilerle tepkime verirler. Bu tepkimenin ürünleri sertleşmiş betonda genleşme meydana getirmekte ve hasara sebep olmaktadır. Uçucu kül katkısı genel olarak alkali-agrega reaksiyonuyla oluşan bu genleşmeyi kontrol etmek için de kullanılır.

Çimentodaki alkaliler ve agregata arasındaki reaksiyon başlıca iki tiptedir:

- 1) Alkali – Karbonat Reaksiyonu
- 2) Alkali – Silika Reaksiyonu

Neville [37], Canpolat ve Yılmaz [17], alkali silika reaksiyonunu önlemede, uçucu kül katkısının etkinliğini kesin olarak kanıtlandığını belirtmektedir. Mortureux ve diğ. [38], puzolan kullanımının alkali silika reaksiyonuna olumlu etkisinin birden fazla yolla olduğunu belirtmektedir;

1) Puzolanlardaki reaktif silika; ortamdaki alkalilerle, reaktif agregadan daha hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve dolayısı ile puzolan kullanımı alkali-silika reaksiyonu için ortamda yeterince alkali bulunmasını önler.

2) Çimentonun puzolanlar ile ikamesi ortama çimento ile birlikte gelen alkali miktarının azalmasını sağlar. Bu durum genellikle böyle olmakla birlikte puzolan kullanımı ile ortama fazladan alkali girişi de mümkündür.

3) Puzolan kullanımı ile $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketiminden dolayı ortamın pH'ı düşer. Bu durum alkali agrega reaktivitesini azaltır.

iii) Donma-Çözülme Etkisine Dayanıklılık: Uçucu küllü betonların donma-çözülme deneyleri sonunda kayıpların daha az olduğu, betona katkı olarak katılması durumunda basınç dayanımlarını artırdığı belirtilmiştir [28].

Puzolanlı çimentoların hidrasyon hızlarının aynı incelikteki Portland çimentolarına göre daha yavaş olduğu bilinmektedir. Bu sebeple, puzolanlı çimento içeren betonlarda donma-çözülme döngülerine karşı yeterli dayanıklılığı aynı incelikteki Portland çimentolu betonlara göre biraz daha geç kazanırlar [7].

iv) Islanma-Kuruma Etkisine Karşı Dayanıklılık: Akman [39, 40]'a göre, zararlı suların betona etkisi üç ana grupta toplanabilir:

1) Birinci grup korozyon, suların beton öğelerinden bazılarını çözmesi ve yıkayarak, beton külesinden uzaklaştırması şeklinde meydana gelir. Beton, boşluklu ve suyun çözme yeteneği yüksekse, bu korozyon iç bölgelere doğru ilerleyebilir. Tatlı su oranı nispeten yüksek bölgelerdeki deniz yapılarında bu korozyona rastlanmaktadır. Uçucu küllü çimentoların bu tür korozyona daha dayanıklı olmaları serbest kireçlerinin düşük olması nedeniyle mümkündür.

2) İkinci grup korozyon, kimyasal tepkimeler sonucu betonun çözülmesidir. Çimentonun esas öğeleri ile kimyasal reaksiyona giren ve kimyasal maddeler taşıyan suların yaptığı suların yaptığı bir korozyon türüdür. Korozyon ürünü ya yıkanır veya ayrık bir amorf kütle oluşturur. Asitli suların (asit karbonik vb.) Mg^{2+} iyonu içeren suların hasarları bu tür korozyona örnektir. Bu korozyon, dolu ve iyi sıkıştırılmış betonlarda da meydana gelebilir. Su basınç gradyanının varlığı diğer bir deyişle tek yanlı ıslanan betonlarda bu korozyon daha şiddetli biçimde görülmektedir. Korozyon ürünlerinin bazılarında tıkama mekanizması gelişebilir, bu durumda korozyon durur veya gecikir.

3) Üçüncü grup korozyon, çözünürlüğü düşük tuzların beton boşluklarında kristalleşmesi ve yapıyı katı fazda genişleterek patlatmasıdır. Beton teknolojisinde geniş biçimde incelen sülfat problemi bu korozyon grubuna girer. Beton boşlukları içine süzülen SO_4^{2-} anyonları, serbest kireçle birleşerek alçı taşına ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) dönüşür, oluşan bu kristal katı cisim çeperlere basınç yaparak tahribata yol açar. İkinci aşamada çimentonun C_3A 'sı ile birleşen alçı taşı etrenjite dönüşür. Hacim artışı daha da büyük olur.

v) *Betonarme Donatısının Korozyonuna Karşı Dayanıklılık (Klor Etkisine Karşı Dayanıklılık)*: Akman [39, 40]'a göre, klorür iyonunun beton bünyesine başlangıçta beton yapımı sırasında mı, yoksa sonradan çevreden difüze olmuş olduğu büyük önem taşır. Bu iki yolla beton içine girmiş olan klorür iyonunun korozyon açısından etkisi farklıdır. Karışım malzemeleri ile (su, agrega veya katkı maddeleri) beton bünyesine giren klorür iyonlarının, bir kısmı, betonun hidrotasyonu sırasında, klinker bileşiklerinden trikalsiyum alüminat (C_3A) ile birleşir. Böylece klorürün bir kısmı bağlanmış olur. Beton bünyesine sonradan difüze edilen klorür iyonları bu reaksiyona katılmadıkları için korozyon açısından daha etkilidir.

Genel olarak uçucu kül, katkılı betonu daha geçirimsiz hale getirmektedir. Bunun sonucu olarak beton bünyesine çevreden oksijen karbondioksit ve klorür iyonu gibi betonarme demirlerinin korozyon hızını artırıcı bileşenlerin girmesini güçleştirmektedir. Bu durum puzolanların, beton içine sonradan difüze edilen klorür iyonlarının zararlı etkilerini ve karbonasyon olayını azaltıcı rol oynaması beklenebilir. Ancak başlangıçta beton içinde bulunan klorür iyonları üzerine puzolan katkısının nasıl bir etki yapmış olduğu henüz tam olarak açıklanamamıştır [39, 41].

Asan ve Yalçın [41]'a göre, korozyon potansiyeli değerleri, uçucu kül katkısının betonarme demirlerinin korozyonuna azaltıcı yönde etki yapmakta olduğunu açıkça ortaya koyabilen değerlerdir.

Uçucu kül etkisinin geç başlaması puzolanik reaksiyon hızlarının normal sıcaklarda düşük hızda olması ile açıklanabilir. Puzolanik reaksiyonlar sonucu beton zamanla daha geçirimsiz bir yapı kazanır. Bunun sonucu olarak elektrot yüzeylerine oksijen ve klorür iyonları difüzyonu güçleşir. Betonarme demirlerinin korozyon hızı azalır [41].

Uçucu kül katılmış betonlarda gözlenen dikkat çekici diğer bir husus da dökümden sonraki ilk günlerde betonarme demirlerinin normal betonlara göre daha aktif hale gelmesidir. Bu durum, uçucu kül katkısının çimentonun hidratasyonu sırasında ortamda pH derecesini düşürücü etkisinden kaynaklanmaktadır [41].

vi) *Sülfürik Asit Etkisine Karşı Dayanıklılık*: Topçu ve Canbaz [28]'a göre, uçucu kül katkısı kullanımı ile yüzeysel aşınma artmakta ve kimyasal etkilere dayanıklılığı sülfürik asit hariç artmaktadır.

Yazıcı [31] çalışmasında, uçucu kül kullanımının, betonun sülfürik asit etkisine karşı dayanıklılığını olumlu yönde etkilediğini belirtmiştir.

2.4.6.2. *Ekolojik ve Ekonomik Etki*

Topçu ve Canbaz [28]'ın çalışmalarına göre, 2000 yılı birim fiyatları ile yapılan maliyet analizinde çimento yerine %20 uçucu kül kullanılması ile beton birim maliyetinde ortalama %10'luk, %40 uçucu kül kullanılması ile de %18'lik bir ekonomik kazanç elde edilmektedir. Ayrıca endüstriyel bir atık olması uçucu külün betonda kullanılması ile bu atığın depolanması maliyeti de düşecektir.

Aruntaş [18]'a göre, uçucu küllerin bacalarda tutulması ile günümüzün çok önemli problemlerinden biri olan çevre kirliliği de kısmen önlenmiş olmaktadır. Öte yandan uçucu küllerin atılması, önemli oranda çevre kirliliğine yol açmaktadır. Uçucu küllerin neden olduğu çevre problemleri arasında, tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgâr erozyonu, toprakta süzülme dolayısıyla toksik madde taşınması ve radyasyon sayılabilir. Bu çevre sorunları nedeniyle tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu ve çevre güzelliği açısından istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Rüzgâr erozyonu ve tozlanma, uçucu küllerin havuzlarda çökeltilmesi veya ıslatılarak taşınması sayesinde önlenmektedir.

2.4.7. **Türk Standartlarında Uçucu Kül**

Türk Standardları Enstitüsü, uçucu kül ile ilgili olarak beş tane standart yayınlamıştır. Bunlar sırasıyla, TS 639, TS 640, TS EN 450, TS EN 451-1 ve TS EN 451-2 standartlarıdır. Bu standartlara ait bilgiler, Tablo 2.5 te sunulmuştur. TS 640, AB'ye uyum çerçevesinde yürürlükten kaldırılmış ve yerine TS EN 197-1 "Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar" standardı uygulamaya konulmuştur.

Tablo 2.5 : Uçucu kül ile ilgili Türk Standardları [18]

Standart No	Standardın Adı	Açıklama
TS 639	Uçucu küller - Çimentoda kullanılan	Tarifi, sınıflandırılması, özellikleri, deney metotları ve kalite kontrolü
TS 640	Uçucu küllü çimento	Fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve deney metotları
TS EN 450	Uçucu kül - Betonda kullanılan	Özelik ve kalite kontrolü
TS EN 451-1	Uçucu kül - Deney metodu - Bölüm 1	Serbest kalsiyum oksit tayini
TS EN 451-2	Uçucu kül - Deney metodu - Bölüm 2	Islak eleme ile incelik tayini

2.5. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Mineral katkıların çimento ile birlikte kullanımının, çevre kirlenmesini azaltıcı etkisinin yanısıra doğal ham maddelerden, yakıt ve elektrik enerjisinden tasarruf sağlayarak ekonomiye de olumlu etkisi olmaktadır.

Yine düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazlarıyla sürüklenen ve filtreler yardımıyla tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda uçucu kül tanecikleri meydana gelmektedir. Yani endüstriyel atık olan uçucu kül, ikincil ürün olarak kullanılarak, çimentoyla birlikte olumlu performans göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, beş farklı portland çimentosuna farklı oranlarda uçucu kül katılmasının çimento/harç özelliklerine ve dayanıklılığına etkilerinin araştırılmasıdır.

Numune üretimi için, beş ayrı üretim tesisinden temin edilen beş farklı katkısız portland çimentosuna (CEM I), referans (%0), %5, %9, %14 olmak üzere üç farklı oranda uçucu kül, çimentoya yerdeğıştirmeli olarak katılmış, su / çimento oranı 0,65 olmak üzere karışıma sokularak 180 adet deney numunesi üretilmiştir. Üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler, 7, 28, 56 güne kadar 20 ± 2 °C su içerisinde bekletilmiştir. Kür süresi sonunda numunelere sırasıyla eğilme, basınç dayanımı ve su emme deneyleri uygulanmıştır. Buradan, numunelerden elde edilen deney sonuçlarının kıyaslaması yapılmıştır.

Durabilite deneyleri için yine beş ayrı üretim tesisinden temin edilen beş farklı katkısız portland çimentoları (CEM I), referans (%0) ve üç farklı oranda uçucu kül katkısı (%5, %9, %14) su/çimento oranı 0,65 olmak üzere karışıma sokularak, 28 günden başlayarak, laboratuvar ortamı-su ve sürekli su ortamlarında kür edilmek üzere 120 adet deney numunesi hazırlanmış ve bu numunelerde 28. ve 56. günlerde ağırlık ve ultrases geçiş süresi ölçümleri yapılmıştır. Numunelerden elde edilen deney sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, bu çalışmada kullanılan malzemeler, bu malzemelerle üretilen harç karışımları, deneyler ve deneylerde kullanılan aletler açıklanmıştır.

3.1. KULLANILAN MALZEMELER

3.1.1. Çimento

Deneylerde TS EN 197-1 standardında belirtilen özelliklere sahip olan CEM I 42,5R katkısız portland çimentoları kullanılmıştır. Kullanılan çimentoların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 3.1 de verilmiştir.

Tablo 3.1 : CEM I tipi çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

	A	S	Ç	N	L	TS EN 197-1 Standardı
Kimyasal Özellikler						
SiO ₂ , %	20,89	20,42	19,43	20,17	19,30	
Al ₂ O ₃ , %	5,61	5,11	5,78	5,92	5,57	
Fe ₂ O ₃ , %	3,48	3,48	3,69	3,37	3,46	
CaO, %	64,63	67,13	64,34	66,95	64,56	
MgO, %	1,37	1,20	0,66	1,00	0,86	
K ₂ O, %	0,71	0,40	0,67	0,58	0,69	
Na ₂ O, %	0,13	0,11	0,20	0,15	0,13	
Cl, %	0,010	0,012	0,010	0,011	0,013	En çok 0,1
Kızdırma Kaybı, %	1,64	1,68	0,20	0,90	2,78	En çok 5
Çözünmeyen Kalıntı, %	0,50	0,72	0,40	0,30	0,42	En çok 5
Serbest Kireç, %	1,70	1,02	1,15	1,25	1,42	
Fiziksel Özellikler						
Özgül Kütle, Mg/m ³	3,21	3,15	3,16	3,08	3,15	
Özgül Yüzey, m ² /kg	337	324	320	296	374	En az 280
Priz Başlangıcı, dakika	180	135	157	156	119	En az 60
Priz Sonu, dakika	245	185	277	194	210	En çok 600
Mekaniksel Özellikler						
2 günlük basınç dayanımı, N/mm ²	27,0	24,9	21,0	25,0	27,2	En az 20
7 günlük basınç dayanımı, N/mm ²	40,1	36,6	34,9	36,0	42,4	En az 31,5
28 günlük basınç dayanımı, N/mm ²	47,6	46,0	44,5	46,4	52,7	En az 42,5 / En çok 62,5

A çimentosunun serbest kireç miktarı ve özgül kütlesi diğer çimentolarından daha fazla, S çimentosunun serbest kireç miktarı diğer çimentolarından daha düşük, Ç çimentosunun 2, 7 ve 28 günlük mukavemet değerleri diğer çimentolarından daha düşük, N çimentosunun özgül kütlesi ve özgül yüzeyi diğer çimentolarından daha düşük ve L çimentosunun özgül yüzeyi ve 28 günlük mukavemeti diğer çimentolarından daha fazladır.

3.1.2. Uçucu Kül

Sarıgazi Set Beton tesislerinden temin edilen, ASTM C 618 standardına göre F sınıfı, düşük kireçli uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.2 de verilmiştir.

Tablo 3.2 : Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Uçucu Kül	Kimyasal Özellikler										Fiziksel Özellikler				
	K.K,	SiO ₂ ,	Al ₂ O ₃ ,	Fe ₂ O ₃ ,	CaO,	MgO,	SO ₃ ,	K ₂ O,	Na ₂ O,	Özgül Kütle, Mg/m ³	Özgül Yüzey, m ² /kg	Elek Üstü, %			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%			40µ	90µ	200µ	
	5,85	60,53	17,22	4,86	5,31	1,91	1,36	2,50	0,65	2,37	445	8,76	0,20	-	

3.1.3. Kum

TS EN 196–1 standardına uygun olup, Trakya bölgesinden temin edilmiş, 2 mm elekten elenmiştir. Granülometrisi Tablo 3.3 de gösterilmiştir.

Tablo 3.3 : Kumun granülometrisi

Kare göz açıklığı (mm)	Elekten geçen malzeme (%)
8,00	99,9
4,00	99,6
2,00	98,3
1,00	95,3
0,50	76,9
0,25	35,1

3.2. NUMUNE ÜRETİMİ

Numuneler, TS EN 196–1 standardına uygun olarak üretilmiştir. Beş farklı üretim tesisinden temin edilen CEM I ile %0 (referans), %5, %9 ve %14 oranlarında uçucu kül katkı, 7, 28 ve 56 günlük 40 × 40 × 160 mm boyutunda numuneler üretilmiştir.

Bütün karışımlara 1350 g kum, 293 g su (su / bağlayıcı oranı 0,65) konuldu. Karışımlardaki çimento ve uçucu külün miktarları ve oranları Tablo 3.4 te verilmektedir. Malzeme miktarları 0,01 g duyarlıklı elektronik tartı ile ölçüldü.

Tablo 3.4 : Numune üretiminde kullanılan uçucu kül ve çimento miktarları

Uçucu Kül/Çimento Kütle Oranı	Uçucu Kül (g)	Çimento (g)
%0	0,0	450,0
%5	22,5	427,5
%9	40,5	409,5
%14	63,0	387,0

Malzeme miktarlarının ölçümlerinin tamamlanmasının ardından karışımın gerçekleştirilebilmesi için mikserde ilk olarak çimento koyularak karışım başlatıldı. Kısa bir süre sonra su ilavesi yapıldı. Ardından hazırlanan elenmiş kum, kum haznesinden mikser içerisindeki karışıma dahil edildi. Karıştırma işlemi otomatik olarak devam etti. Uçucu kül katkılı bağlayıcılarda; çimento miktarı, katılacak uçucu kül miktarı kadar eksiltildi.

Taze harç karıştırma ve yerleştirme işlemi sonunda kalıplar uygun bölümlere koyuldu. Kalıpların üzerine polietilen örtüldü. 24 saat nihayetinde kalıplardan çıkarılan numuneler deneye kadar su içerisinde saklandı. (Şekil 3.1)



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.1 : Numunelerin üretimi ve muhafazası

Şekil 3.1 (a) : Harç mikseri, Şekil 3.1 (b) : Harç kalıpları, Şekil 3.1 (c) : Sarsma tablası

Numunelere Tablo 3.5 te gösterildiği üzere kodlar verildi.

Tablo 3.5 : Numune kodları

UK/Çimento Oranı Çimento Üretim Tesisi	%0	%5	%9	%14
A	A0	A5	A9	A14
S	S0	S5	S9	S14
Ç	Ç0	Ç5	Ç9	Ç14
N	N0	N5	N9	N14
L	L0	L5	L9	L14

3.3. YAPILAN DENEYLER

Mekanik, fiziksel ve durabilite olmak üzere 3 tür deney yapıldı.

3.3.1. Mekanik Deneyler

Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri, TS EN 196–1 standardına uygun olarak yapılmıştır.

3.3.1.1. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı deneyi, TS EN 196–1 / Mart 2002 paragraf 4.7 ve 9'a uygun olarak yapılmıştır. Deney aletinin yükleme düzeni birbirinden 100 mm ± 0,5 mm uzaklıkta olan iki destek prizmadan ibarettir. Bu iki destek prizmanın tam orta yerinde yükleme yapacak aksam yer almaktadır. Bu üç parçanın eksenlerinden geçen düşey düzlemler birbirine paralel olmalı ve deney süresince paralel kalmalıdır. Üretilen 40 × 40 × 160 mm boyutundaki 180 adet harç prizması, kalıptan çıkmış yan yüzeylerinden biri üzerine ve uzunluğuna eksenine mesnetlerin eksenine dik gelecek şekilde mesnetler üzerine koyuldu. Yükleme hızı saniyede 50 N ± 10 N olacak şekilde ayarlandı.

Eğilmede çekme mukavemeti f_c aşağıdaki bağıntı ile tam sayıya yuvarlatılarak hesaplandı.

$$f_c = 1,5 (P \cdot L) / b^3 \quad (3.1)$$

Burada;

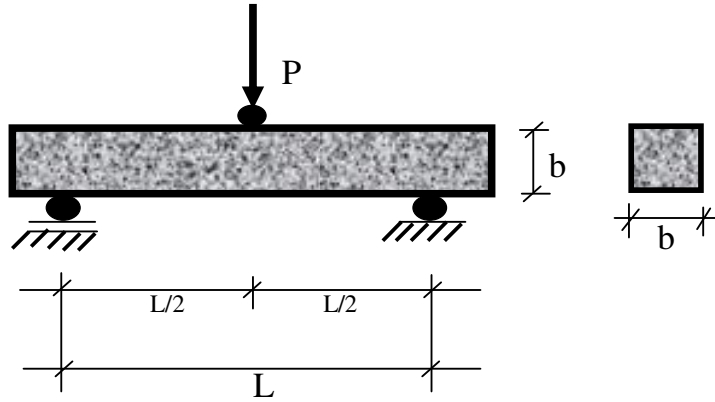
b = Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm)

P = Prizmanın açıklık ortasına uygulanmış olan kırılma kuvveti (Newton)

L = Destek prizmaların eksenleri arasındaki uzaklık (mm)

f_c = Eğilmede çekme mukavemeti (N/mm^2)

$$f_c = 0,234 \cdot P$$



Şekil 3.2 : Eğilme Dayanımı Deneyi

3.3.1.2. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi, TS EN 196-1 / Mart 2002 paragraf 9.1'e uygun olarak yapılmıştır. Eğilme deneyi sonunda oluşan 180 adet yarım prizma Şekil 3.3 te görülen cihaz kullanılarak yan yüzeylerinden yüklemek suretiyle deneye tâbi tutuldu. Yarım prizmalar, cihazın plakaları arasına $\pm 0,5$ mm den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek ve prizmanın arka yüzü yardımcı plakalardan 10 mm taşacak şekilde uzunlamasına yerleştirildi. Yük 2400 ± 200 N/s hızda olmak üzere düzgün şekilde numune kırılana kadar arttırıldı.

Basınç dayanımı aşağıdaki bağıntıyla hesaplandı:

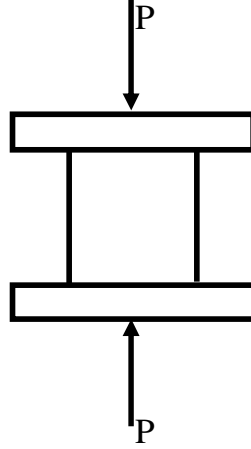
$$f_c = P / 1600 \quad (3.2)$$

Burada;

f_c : Basınç dayanımı (N/mm^2)

P : Kırılmadaki en büyük yük (N)

1600 : Plakaların veya yardımcı plakaların ($40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$) alanıdır (mm^2).



Şekil 3.3 : Basınç Dayanımı Deneyi

3.3.2. Fiziksel Deneyler

3.3.2.1. Su Emme Deneyi

Su emme deneyi standart kür etkisindeki numunelere 7., 28. ve 56. günlerde tatbik edilmiştir. Eğilme dayanımı deneyi sonunda oluşan 180 adet yarım prizma 24 saat boyunca $100\text{ }^\circ\text{C}$ deki etüvde bekletildi ve kuru ağırlık ölçümü yapıldı. Sonrasında su dolu kaba konularak 24 saat $22 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ su içerisinde bekletildi ve prizma yüzeylerindeki su temizlenerek su emmiş durumdaki ağırlığı ölçüldü. Bu değerlerden kütlece su emme oranı aşağıdaki bağıntı ile hesaplandı.

$$W_S = (W_I - W_K) / W_K \times 100 \quad (3.3)$$

Burada;

W_S : Su emme oranı (%)

W_I : Islak kütle (g)

W_K : Kuru kütle (g)



Şekil 3.4 : Etiv

3.3.3. Durabilite Deneyleri

Islanma-kuruma etkisinin üretilen harçlarda meydana getirdiği tahribatın belirlenmesi amacıyla $40 \times 40 \times 160$ mm boyutunda 60 adet harç numunesi ıslanma-kuruma tekrarlarına maruz bırakıldı. 28 günlük standart kürü takiben ıslanma etkisi 22 ± 2 °C suda, kuruma etkisi laboratuvar ortamında oluşturuldu. Islanma-kuruma etkisi 48 saatlik periyotlarla toplam 28 gün sürdürüldü. 60 adet numune ise 28 günlük standart kürü müteakiben devamlı olarak 22 ± 2 °C suda bekletildi. Islanma-kuruma döngüsüne başlanılmadan önce ve 28. günde ultrases geçiş hızı ve ağırlık ölçümleri yapıldı.

3.3.3.1. Ultrases Hızı

Ultrases hızı ölçümüne başlamadan evvel ölçüm yapılacak numuneler kurumaya bırakılarak daha sonra deneye tabi tutulmuşlardır. Hız değerleri numune boyutunun alette ölçülen zamana bölünmesiyle elde edildi.

3.3.3.2. Ağırlık Değişimi Deneyi

Ağırlık değişiminin belirlenmesi amacıyla 0,01 g hassasiyetli terazi kullanıldı, tüm tartım işlemlerinden önce harç numuneleri yüzey kuru (doymuş) duruma getirildi. Ağırlık değişimi oranı aşağıdaki bağıntıdan hesaplandı.

$$W_D = (W_t - W_o) / W_o * 100 \quad (3.4)$$

Burada;

W_D : Ağırlık değişimi (%)

W_t : t süredeki ağırlık değişimi (g)

W_o : Başlangıçtaki (28. gündeki) ağırlık (g)

4. BULGULAR

Bu bölümde, yapılan deneylerin sonuçları tablolar ve grafikler halinde açıklanmıştır.

4.1. MEKANİK DENEY SONUÇLARI

Referans ve sınaama numunelerinin 7., 28. ve 56. günlerdeki eğilme, basınç dayanımları ve referans çimentonun 28. gün dayanımına oranları Tablo 4.1 ve Tablo 4.2 de verilmiştir.

4.1.1. Eğilme Dayanımı Denev Sonuçları

Tablo 4.1 ve Şekil 4.1 de görüldüğü gibi, erken yaşta, uçucu kül katkısıyla tüm numunelerin dayanımlarında düşüşler gözlenmiştir.

7 günlük süreçte, L0 numunesi en yüksek dayanımı, S9 ve Ç9 numuneleri ise en düşük dayanımları göstermiştir. En düşük dayanımlar %9 uçucu kül katkılı numunelerde görülmüştür. %5 uçucu kül katkılı numuneler, referans numunelere yakın dayanım değerleri göstermiştir. %14 uçucu kül katkılı numunelerin dayanımları, %5 ve %9 uçucu kül katkılı numunelerin dayanımları arasında değerler vermiştir.

7. günde, sırasıyla referans, %5, %9, %14 uçucu kül katkılı numunelerden L0, S5, L9, S14 numuneleri en yüksek, N0, L5, S9, L14 numuneleri ise en düşük dayanımları vermiştir.

L çimentosunun %5 ve %14 uçucu kül katkılarıyla diğer çimentolara nazaran daha olumsuz etkilendiği numune dayanımlarının düştüğü saptanmıştır. Yine %9 uçucu kül katkısıyla S, Ç, N, L çimentolarının numune dayanımlarında düşüşler gözlenmiştir.

28 günlük süreçte, A5 numunesi en yüksek, A9 numunesi en düşük dayanımı göstermiştir.

28. günde erken yaştakine benzer şekilde, %5 uçucu kül katkıli numuneler referans numunelere yakın dayanım değerleri göstermiştir. En düşük dayanımlar, %9 uçucu kül katkıli numunelerde görülmüştür. %14 uçucu kül katkıli numunelerin dayanımları, %5 ve %9 uçucu kül katkıli numunelerin dayanımları arasında değerler vermiştir.

Sırasıyla referans, %5, %9, %14 uçucu kül katkıli numunelerden S0, A5, L9, N14 numuneleri en yüksek, Ç0, Ç5, A9, A14 numuneleri ise en düşük dayanımları almıştır.

A çimentosu %5 uçucu kül katkısıyla dayanım kazanmış, %9 ve %14 uçucu kül katkısıyla dayanım kaybetmiştir. N çimentosu tüm katkı oranlarıyla benzer dayanım değerleri vermiştir. L çimentosu da %5 uçucu kül katkısıyla dayanım kazanmıştır.

56. günde, A0 numunesi en yüksek, Ç9 numunesi en düşük dayanımı göstermiştir.

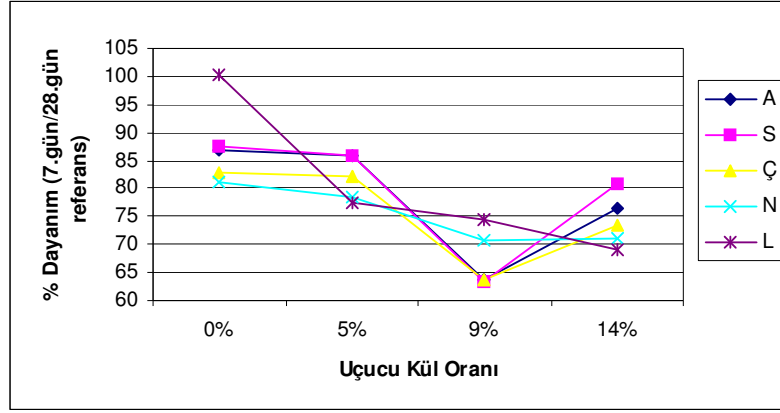
Sırasıyla referans, %5, %9, %14 uçucu kül katkıli numunelerden A0, A5, N9, N14 numuneleri en yüksek, N0, Ç5, Ç9, Ç14 numuneleri ise en düşük dayanımları almıştır.

56 günlük süreçte, A ve Ç çimentolarının uçucu kül katkısıyla dayanımları düşmüş, en düşük dayanımları %9 uçucu kül katkısı ile almıştır. S çimentosu da tüm katkı oranlarıyla dayanımını düşürmüş, %14 uçucu kül katkısı ile en düşük dayanım değerini almıştır. %5 ve %9 uçucu kül katkılarıyla L ve N çimentolarının dayanımlarında artış görülmüştür.

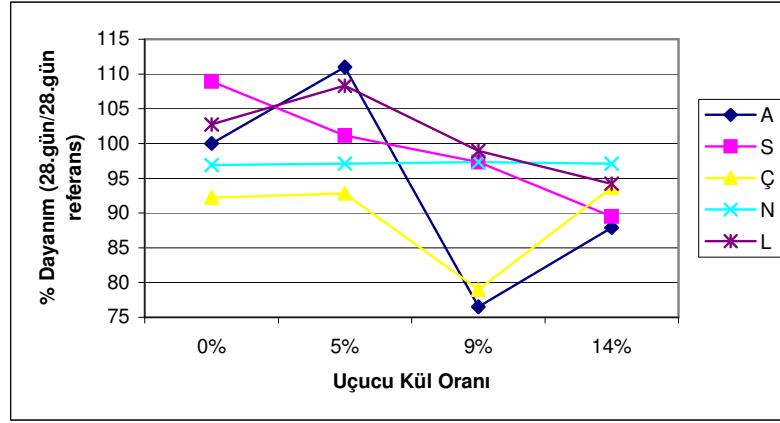
56. günde, %14 uçucu kül katkısı içeren A14, S14, Ç14 ve N14 numunelerinin dayanımlarında artış görülmüştür.

Tablo 4.1 : Numunelerin eğilme dayanımı değerleri

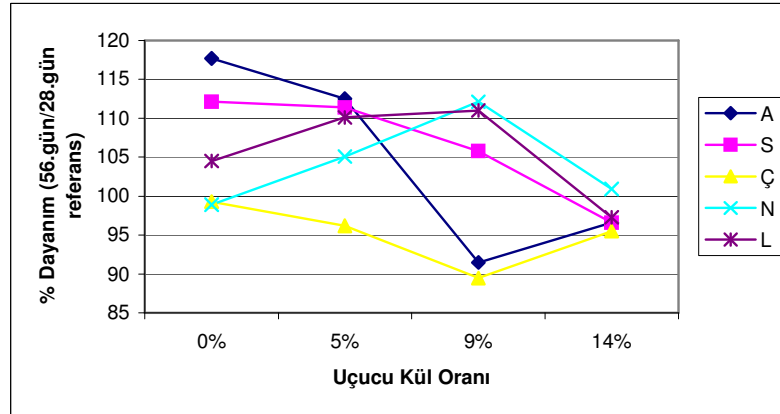
Harc Kodu	7 gün (N/mm ²)	28 gün (N/mm ²)	56 gün (N/mm ²)	Bağlı Dayanım % (7.gün/28.gün referans)	Bağlı Dayanım % (28.gün/28.gün referans)	Bağlı Dayanım % (56.gün/28.gün referans)
A0	3,89	4,47	5,26	87,0	100,0	117,7
A5	3,83	4,96	5,03	85,7	111,0	112,5
A9	2,85	3,42	4,09	63,8	76,5	91,5
A14	3,42	3,93	4,32	76,5	87,9	96,6
S0	3,91	4,87	5,01	87,5	108,9	112,1
S5	3,84	4,52	4,98	85,9	101,1	111,4
S9	2,83	4,35	4,73	63,3	97,3	105,8
S14	3,61	4,00	4,32	80,8	89,5	96,6
Ç0	3,71	4,12	4,44	83,0	92,2	99,3
Ç5	3,67	4,15	4,30	82,1	92,8	96,2
Ç9	2,85	3,53	4,00	63,8	79,0	89,5
Ç14	3,28	4,19	4,27	73,4	93,7	95,5
N0	3,63	4,33	4,42	81,2	96,9	98,9
N5	3,51	4,34	4,70	78,5	97,1	105,1
N9	3,16	4,35	5,01	70,7	97,3	112,1
N14	3,18	4,34	4,51	71,1	97,1	100,9
L0	4,49	4,59	4,67	100,4	102,7	104,5
L5	3,46	4,84	4,92	77,4	108,3	110,1
L9	3,32	4,42	4,96	74,3	98,9	111,0
L14	3,09	4,21	4,35	69,1	94,2	97,3



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.1 : Kür havuzunda bekletilen numunelerde eğilme dayanımının referans numunenin eğilme dayanımına oranı

Şekil 4.1 (a) : 7. gün / 28. gün referans, Şekil 4.1 (b) : 28. gün / 28. gün referans, Şekil 4.1 (c) : 56. gün / 28. gün referans

4.1.2. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Tablo 4.2 ve Şekil 4.2 de görüldüğü üzere, basınç dayanımında, eğilme dayanımında olduğu gibi, erken yaşta, uçucu kül katkısı tüm numunelerde dayanım kaybına yol açmıştır.

7 günlük süreçte, L0 numunesi en yüksek, Ç14 numunesi en düşük dayanımı göstermiştir. %5 uçucu kül katkısı ile referans numunelere yakın ancak daha düşük dayanım değerleri okunmuştur. En düşük dayanımlar %9 katkılı numunelerde görülmüş, %14 uçucu kül katkılı numunelerin dayanımları %5 ve %9 uçucu kül katkılı numunelerin dayanımları arasında değerler vermiştir.

7. günde sırasıyla referans, %5, %9, %14 uçucu kül katkılı numunelerden L0, A5, L9, L14 numuneleri en yüksek, Ç0, Ç5, N9, Ç14 numuneleri ise en düşük dayanımları almıştır.

L çimentosu, referans numuneye en yakın dayanımı %14 uçucu kül katkısı ile almıştır. N, S, A, Ç çimentoları ise %5 uçucu kül katkısı ile referans numuneye yakın değerler göstermiştir. Ç çimentosunun referans ve uçucu kül katkılı numunelerinin, diğer çimentolardan daha düşük dayanım değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

28. günde, uçucu kül katkısıyla N ve Ç çimentoları dayanımlarını arttırmış, A, S, L çimentolarında dayanım kayıpları görülmüştür.

28 günlük süreçte, L0 numunesi en yüksek, S9 numunesi en düşük dayanımı göstermiştir.

Sırasıyla referans, %5, %9 ve %14 uçucu kül katkılı numunelerden L0, L5, L9, L14 numuneleri en yüksek, N0, S5, S9, S14 numuneleri ise en düşük dayanımları vermiştir.

L çimentosu uçucu kül katkısı kullanıldığında da diğer tüm numunelerden daha fazla dayanıma sahip olmuştur. Katkı kullanıldığında A, L ve S çimentolarının dayanımlarında düşüşler görülürken, N çimentosunda %5 ve %9 uçucu kül katkıları ile Ç çimentosunda sadece %9 uçucu kül katkısı ile dayanım artışı görülmüştür.

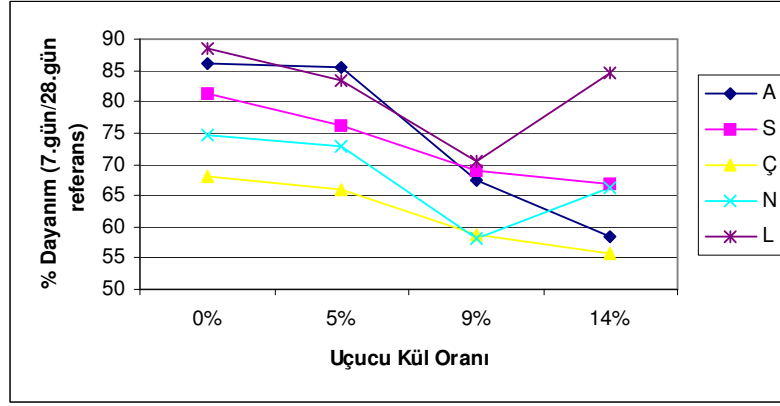
56. günde, S çimentosu hariç diğer çimentolarda farklı oranda uçucu kül katkılarının kullanılması ile dayanım artışları görülmüştür.

Sırasıyla referans, %5, %9 ve %14 uçucu kül katkılı numunelerden S0, N5, L9, L14 numunelerien yüksek, Ç0, Ç5, S9, Ç14 numuneleri ise en düşük dayanımları vermiştir.

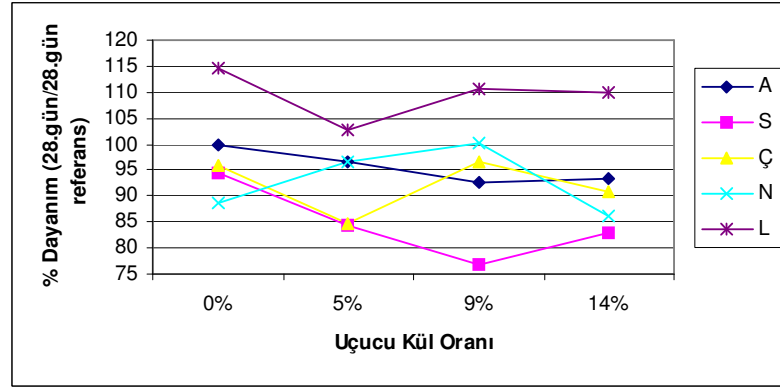
56 günlük süreçte, L çimentosu %5, Ç çimentosu %9, N ve A çimentoları ise %5 ve %9 uçucu kül katkıları ile referans numunelerden fazla dayanımlara ulaşmıştır. Ç çimentosu 7. ve 28. günde olduğu gibi 56. günde de diğer çimentolardan daha düşük dayanım değerleri göstermiştir.

Tablo 4.2 : Numunelerin basınç dayanımı değerleri

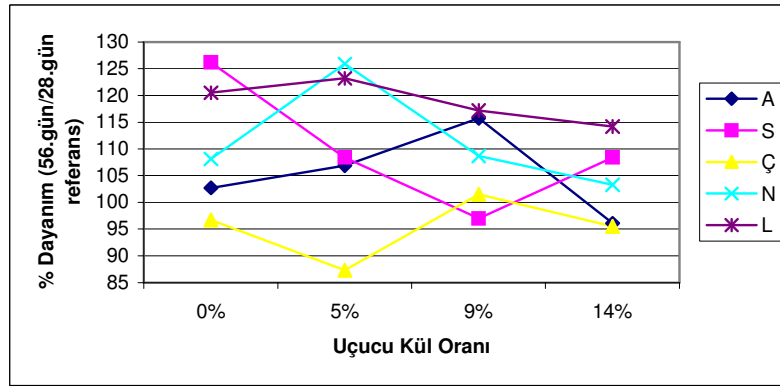
Harç Kodu	7 gün (N/mm ²)	28 gün (N/mm ²)	56 gün (N/mm ²)	Bağlı Dayanım % (7.gün/28.gün referans)	Bağlı Dayanım % (28.gün/28.gün referans)	Bağlı Dayanım % (56.gün/28.gün referans)
A0	28,6	33,2	34,1	86,1	100,0	102,7
A5	28,4	32,1	35,5	85,5	96,7	106,9
A9	22,4	30,8	38,4	67,5	92,8	115,7
A14	19,4	31,0	31,9	58,4	93,4	96,1
S0	27,0	31,3	41,9	81,3	94,3	126,2
S5	25,3	28,0	36,0	76,2	84,3	108,4
S9	22,9	25,5	32,2	69,0	76,8	97,0
S14	22,2	27,5	36,0	66,9	82,8	108,4
Ç0	22,6	31,8	32,1	68,1	95,8	96,7
Ç5	21,9	28,1	29,0	66,0	84,6	87,3
Ç9	19,5	32,1	33,7	58,7	96,7	101,5
Ç14	18,5	30,2	31,7	55,7	91,0	95,5
N0	24,8	29,4	35,9	74,7	88,6	108,1
N5	24,2	32,1	41,8	72,9	96,7	125,9
N9	19,3	33,3	36,1	58,1	100,3	108,7
N14	22,0	28,6	34,3	66,3	86,1	103,3
L0	29,4	38,0	40,0	88,6	114,5	120,5
L5	27,7	34,1	40,9	83,4	102,7	123,2
L9	23,4	36,8	38,9	70,5	110,8	117,2
L14	28,1	36,5	37,9	84,6	109,9	114,2



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.2 : Kür havuzunda bekletilen numunelerde basınç dayanımının referans numunenin basınç dayanımına oranı

Şekil 4.2 (a) : 7. gün / 28. gün referans, Şekil 4.2 (b) : 28. gün / 28. gün referans, Şekil 4.2 (c) : 56. gün / 28. gün referans

4.2. FİZİKSEL DENEY SONUÇLARI

4.2.1. Su Emme Deney Sonuçları

Referans ve sına ma numunelerinin 7, 28 ve 56 günlük su emme değ erleri ile bunların referans ç imentonun 28. gün su emme değ erine oranları Tablo 4.3 ve Ş ekil 4.3 te verilmiştir.

Tablo 4.3 ve Ş ekil 4.3 te görüldüğü üzere, erken yaş ta, farklı oranlardaki uçucu kül katkıları ile tüm ç imentolarda su emme artmıştır.

7 günlük süreçte, sırasıyla referans, %5, %9 ve %14 uçucu kül katkılı numunelerden N0, N5, N9, L14 numuneleri en yüksek A0, A5, L9, A14 numuneleri ise en düşük su emme değ erlerini vermiştir.

7. günde, N ç imentosunun su emmesi diğ er ç imentolarınkinden daha yüksek, A ç imentosunun su emmesi diğ er ç imentolarınkinden daha düş üktür. A14 numunesinin su emmesi diğ er ç imentolarınkinden %15 daha düşük değ erdedir.

28. günde su emme, %5 uçucu kül katkılı numunelerin tümünde artmış, %9 uçucu kül katkısı ile N ç imentosu hariç diğ er numunelerde azalmış, %14 uçucu kül katkısı ile A hariç diğ er numunelerde artmıştır. N14 ve L14 numunelerinin su emmesi diğ erlerine nazaran %15 daha fazladır.

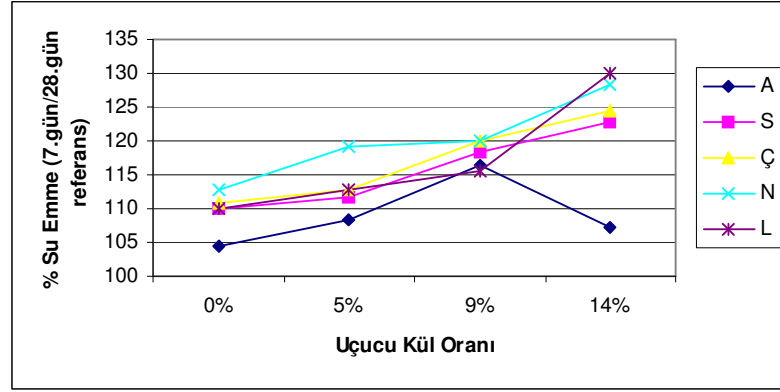
28 günlük süreçte, sırasıyla referans, %5, %9 ve %14 uçucu kül katkılı numunelerden L0, L5, N9, N14 numuneleri en yüksek, A0, A5, A9, A14 numuneleri ise en düşük su emme değ erlerini vermiştir.

56. günde su emme, %5 uçucu kül katkılı numunelerin hepsinde artmış, %9 uçucu kül katkısı ile S, Ç, A ç imentoları hariç diğ er ç imentolarda artmış, %14 uçucu kül katkısı ile N hariç diğ er ç imentolarda artmıştır.

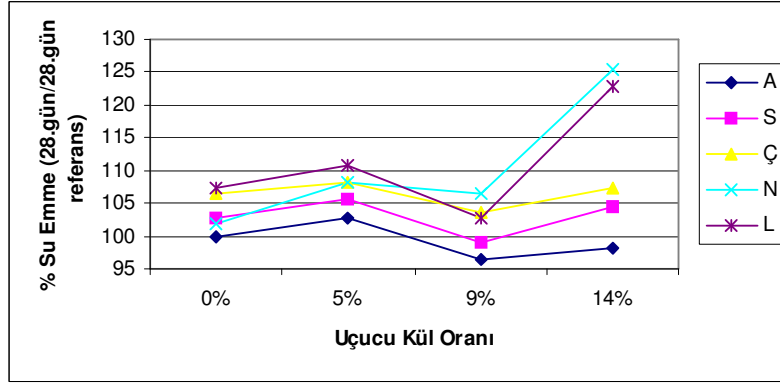
56 günlük süreçte, sırasıyla referans, %5, %9 ve %14 uçucu kül katkılı numunelerden N0, Ç5, N9, S14 numuneleri en yüksek, A0, L5, A9, A14 numuneleri ise en düşük su emme değ erlerini vermiştir.

Tablo 4.3 : Numunelerin su emme değerleri

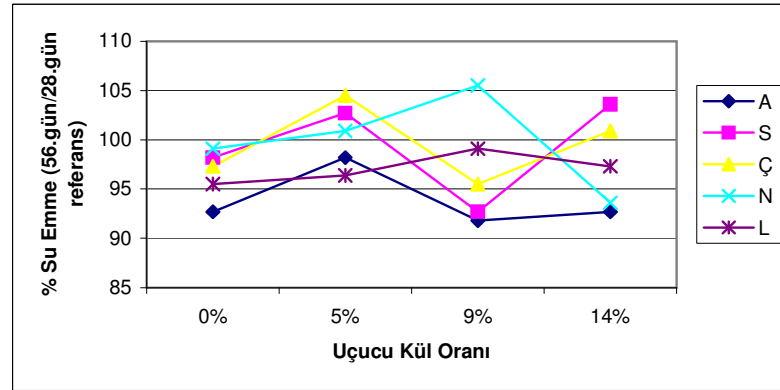
Harç Kodu	7 gün (%)	28 gün (%)	56 gün (%)	Bağlı Su Emme % (7.gün/28.gün referans)	Bağlı Su Emme % (28.gün/28.gün referans)	Bağlı Su Emme % (56.gün/28.gün referans)
A0	11,5	11,0	10,2	104,5	100,0	92,7
A5	11,9	11,3	10,8	108,2	102,7	98,2
A9	12,8	10,6	10,1	116,4	96,4	91,8
A14	11,8	10,8	10,2	107,3	98,2	92,7
S0	12,1	11,3	10,8	110,0	102,7	98,2
S5	12,3	11,6	11,3	111,8	105,5	102,7
S9	13,0	10,9	10,2	118,2	99,1	92,7
S14	13,5	11,5	11,4	122,7	104,5	103,6
Ç0	12,2	11,7	10,7	110,9	106,4	97,3
Ç5	12,4	11,9	11,5	112,7	108,2	104,5
Ç9	13,2	11,4	10,5	120,0	103,6	95,5
Ç14	13,7	11,8	11,1	124,5	107,3	100,9
N0	12,4	11,2	10,9	112,7	101,8	99,1
N5	13,1	11,9	11,1	119,1	108,2	100,9
N9	13,2	11,7	11,6	120,0	106,4	105,5
N14	14,1	13,8	10,3	128,2	125,5	93,6
L0	12,1	11,8	10,5	110,0	107,3	95,5
L5	12,4	12,2	10,6	112,7	110,9	96,4
L9	12,7	11,3	10,9	115,5	102,7	99,1
L14	14,3	13,5	10,7	130,0	122,7	97,3



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.3 : Kür havuzunda bekletilen numunelerde su emme miktarının referans numunenin su emme miktarına oranı

Şekil 4.3 (a) : 7. gün / 28. gün referans, Şekil 4.3 (b) : 28. gün / 28. gün referans, Şekil 4.3 (c) : 56. gün / 28. gün referans

4.3. DURABİLİTE DENEYLERİNİN SONUÇLARI

Islanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan 60 adet harcın ve aynı bileşimlere sahip devamlı suda bekletilen referans 60 adet farklı harcın 28 günlük standart kürün ardından başlangıçta (28.gün) ve 56. günlerde ultrases hızı ve ağırlık ölçümü yapılmış, meydana gelen değişimler izlenmiştir. Deney sonuçları Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 te verilmiştir.

4.3.1. Ultrases Hızı Deney Sonuçları

Tablo 4.4 ve Şekil 4.4 te görüldüğü gibi, ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numuneler üzerinde yapılan ultrases hızı ölçümlerinde, numunelerden sadece %9 uçucu kül katkılı olanların ultrases hızlarında artışlar görülmüştür. %9 uçucu kül katkısı ile A, S ve N çimentolarının ultrases hızları artmıştır.

Sırasıyla referans %5, %9 ve %14 uçucu kül katkılı, ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerden L0, S5, N9, L14 numuneleri en yüksek, A0, A5, L9, A14 numuneleri ise en düşük ultrases hızlarını vermiştir.

A, S ve N çimentolarının %9 uçucu kül katkısıyla ultrases hızları artmış, L ve Ç çimentolarının uçucu kül katkısıyla ultrases hızları azalmıştır.

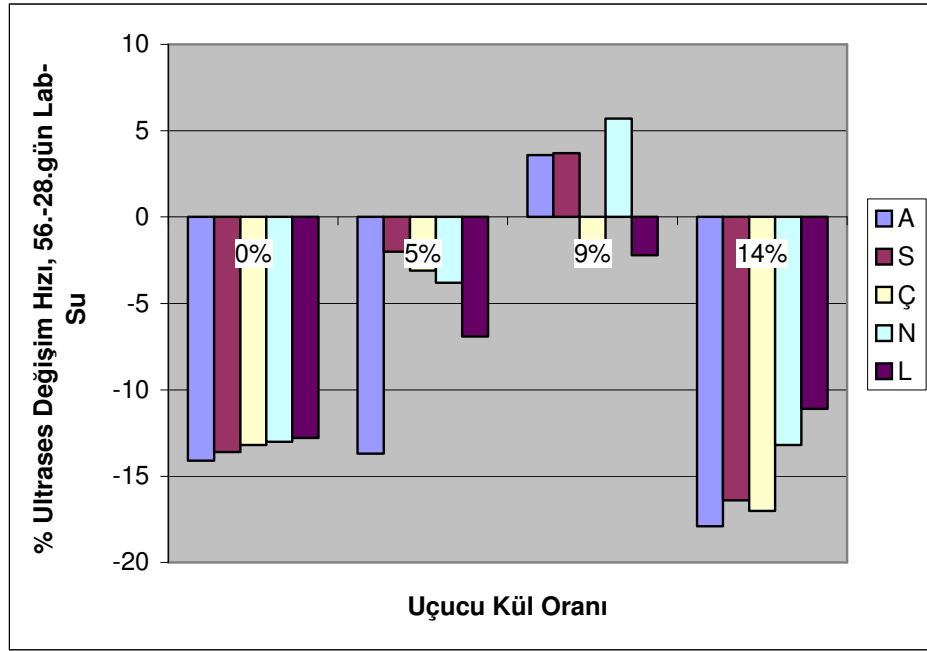
Islanma – kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerden sadece A9, S9, N9 numunelerinde standart küre tabi tutulan A9, S9, N9 numunelerinden daha fazla ultrases hızı değerleri okunmuştur. Diğer tüm numunelerin ultrases hızlarında düşüşler görülmüştür.

Standart küre tabi tutulan referans (sadece su ortamında bekletilen) numunelerin ultrases hızı değerlerinde artış görülmüştür.

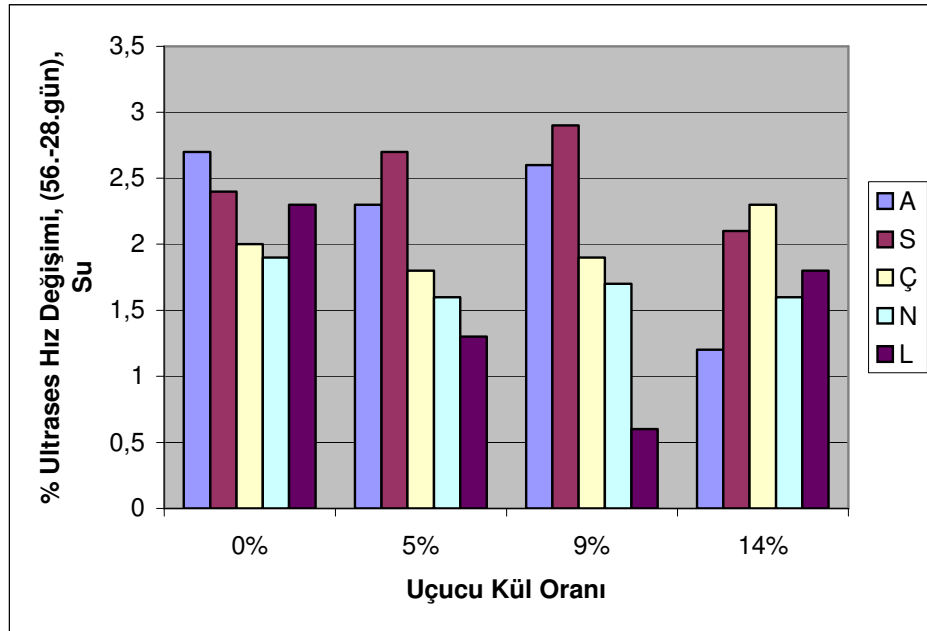
Sırasıyla referans, %5, %9 ve %14 uçucu kül katkılı numunelerden A0, S5, S9, Ç14 numuneleri en yüksek, N0, L5, L9, A14 numuneleri ise en düşük ultrases hızı değerlerini vermiştir.

Tablo 4.4 : Islanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde ultrases hızı değişimi

Harç Kodu	28.gün (km/s) , Lab.-Su	56.gün (km/s) , Lab.-Su	Bağlı Hız Değişimi % (56.gün-28.gün), Lab.-Su	28.gün (km/s) , Su	56.gün (km/s) , Su	Bağlı Hız Değişimi % (56.gün-28.gün), Su
A0	3,83	3,29	-14,2	3,94	4,04	2,7
A5	3,80	3,28	-13,6	3,90	3,99	2,3
A9	3,62	3,75	3,6	3,86	3,96	2,6
A14	3,85	3,16	-18,0	3,69	3,73	1,2
S0	3,75	3,24	-13,7	3,88	3,97	2,4
S5	3,93	3,85	-2,0	3,78	3,88	2,7
S9	3,80	3,94	3,7	3,95	4,06	2,9
S14	3,83	3,20	-16,5	3,86	3,94	2,1
Ç0	3,78	3,28	-13,1	3,79	3,86	2,0
Ç5	3,84	3,72	-3,1	3,85	3,92	1,8
Ç9	3,92	3,83	-2,4	3,75	3,82	1,9
Ç14	3,88	3,22	-16,9	3,71	3,84	2,3
N0	3,78	3,29	-12,9	3,66	3,73	1,9
N5	3,65	3,51	-3,8	3,78	3,84	1,6
N9	3,52	3,72	5,7	3,86	3,93	1,7
N14	3,63	3,15	-13,2	3,77	3,83	1,6
L0	3,83	3,34	-12,8	3,78	3,87	2,3
L5	3,61	3,36	-6,9	3,71	3,76	1,3
L9	3,67	3,59	-2,1	3,89	3,91	0,6
L14	3,52	3,13	-11,2	3,63	3,70	1,8



(a)



(b)

Şekil 4.4 : Islanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde ultrases hızı değişim oranı

Şekil 4.4 (a) : 56. gün / 28. gün, Laboratuar-Su, Şekil 4.4 (b) : 56. gün / 28. gün, Su

4.3.2. Ağırlık Değişimi Deney Sonuçları

Islanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde 28 günlük periyodun sonunda ağırlık değişimi, Tablo 4.5 ve Şekil 4.5 te görüldüğü üzere tüm numunelerde negatif yönde olmuştur.

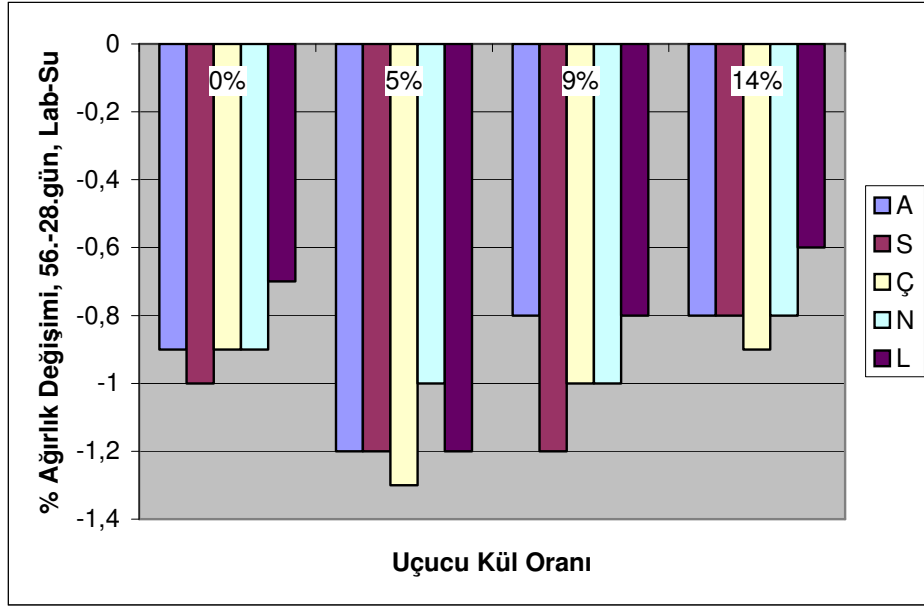
Sırasıyla referans, %5, %9 ve %14 uçucu kül katkılı numunelerden L0, N5, A9, Ç14 numuneleri en yüksek, S0, Ç5, S9, Ç14 numuneleri ise en düşük ağırlık değişimi yüzdelerini vermiştir.

Standart küre maruz bırakılan referans tüm numunelerde ağırlık değişimi pozitif yönde olmuştur.

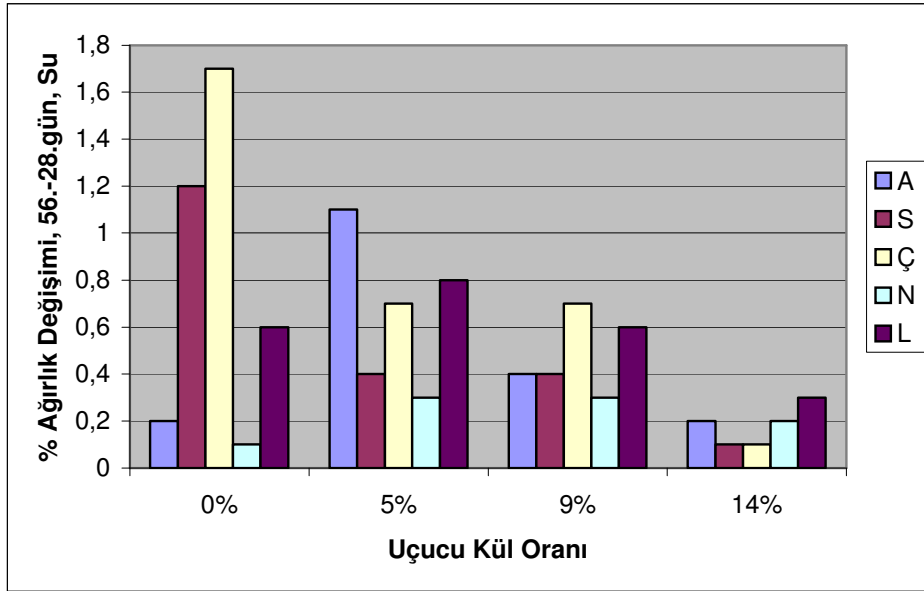
Sırasıyla referans, %5, %9 ve %14 uçucu kül katkılı numunelerden Ç0, A5, Ç9, L14 numuneleri en yüksek, N0, N5, N9, Ç14 numuneleri ise en düşük ağırlık değişimi yüzdelerini vermiştir.

Tablo 4.5 : Islanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişimi

Harç Kodu	28.gün (g), Lab.-Su	56.gün (g), Lab.-Su	W56 %, Lab.-Su	28.gün (g), Su	56.gün (g), Su	W56 %, Su
A0	545,7	540,9	-0,9	554,3	555,4	0,2
A5	548,0	541,6	-1,2	558,5	564,6	1,1
A9	539,0	534,7	-0,8	547,6	549,8	0,4
A14	544,3	539,7	-0,8	553,1	554,2	0,2
S0	542,7	537,2	-1,0	550,3	556,9	1,2
S5	543,2	536,7	-1,2	550,9	553,1	0,4
S9	562,3	555,8	-1,2	574,4	576,7	0,4
S14	538,5	533,9	-0,8	549,0	549,5	0,1
Ç0	556,5	551,4	-0,9	567,7	577,3	1,7
Ç5	549,3	542,2	-1,3	564,5	568,5	0,7
Ç9	545,0	539,3	-1,0	554,6	558,5	0,7
Ç14	543,7	538,8	-0,9	554,4	554,9	0,1
N0	546,3	541,4	-0,9	576,1	576,7	0,1
N5	563,0	557,1	-1,0	575,7	577,2	0,3
N9	552,0	546,6	-1,0	572,3	574,0	0,3
N14	556,0	551,3	-0,8	573,7	574,8	0,2
L0	554,0	549,9	-0,7	556,9	560,3	0,6
L5	558,3	551,6	-1,2	589,5	594,2	0,8
L9	558,3	553,7	-0,8	562,2	565,6	0,6
L14	546,3	542,9	-0,6	576,6	578,3	0,3



(a)



(b)

Şekil 4.5 : Islanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişimi oranı

Şekil 4.5 (a) : 56. gün / 28. gün, Laboratuar-Su, Şekil 4.5 (b) : 56. gün / 28. gün, Su

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu bölümde, çalışma bulguları değerlendirilmiş ve varılan sonuçlar mevcut literatür bilgisi ile birlikte yorumlanmıştır. Çalışmanın geliştirilmesi amacıyla ileride yapılacak olan araştırmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

5.1. MEKANİK DENEY SONUÇLARI

- Erken yaşlarda, numunelerde uçucu kül katkısının miktarı arttıkça eğilme ve basınç dayanımı kayıpları artmakta ve tüm uçucu kül katkılı numunelerin basınç dayanımları referans numunelerden düşük değerler almaktadır. Bu sonuç, uçucu kül katkısının dayanımı arttıran etkilerinin görülmesi için gereken ve klinkerin hidratasyonu ile açığa çıkan Ca(OH)_2 'nin, 7 günlük süreçte yeteri kadar oluşmamasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Tokyay ve Erdoğan [42]'ye göre, uçucu kül kullanılması ile betonun erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımları düşmektedir. Topçu ve Canbaz [28]'a göre de uçucu kül kullanımı erken yaşta betonun dayanımını azaltmakta ve uçucu kül miktarı arttırıldıkça dayanım daha geç kazanılmaktadır.
- %5 uçucu kül katkılı numunelerde referans numunelerinkine yakın, %9 uçucu kül katkılı numunelerde en düşük, %14 uçucu kül katkılı numunelerde %5 ve %9 uçucu kül katkılı numuneler arasında eğilme ve basınç dayanımı değerleri okunmaktadır.
- Erken yaşta, eğilme ve basınç dayanımının en yüksek olduğu numune L0' dır. L çimentosunun analiz sonuçlarındaki 7 günlük mukavemet değerinin diğer çimentolarından daha fazla olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuç ile analiz sonucu birbirlerini doğrulamaktadır.

- 7. günde, farklı oranlarda uçucu kül katkısıyla en düşük dayanımları ise Ç çimentosu vermiştir. Çimentoların analiz sonuçlarındaki mukavemet değerleri ile sonuçların birbirlerini doğruladığı görülmektedir.
- 7 – 28 günlük süreçte, N5, N9, Ç9 numuneleri referans numunelerden daha fazla dayanım değerleri almaktadır. 7. günde olduğu gibi en yüksek dayanım L0 numunesinde görülmektedir.
- Uçucu kül katkılı çimentolarda 28. gün sonunda katkı oranının artmasıyla dayanım düşüşlerinin, puzolanik etkinin görülebilmesi için gerekli olan serbest kirecin henüz istenen miktarda oluşmadığından ve puzolanların ortamdaki seyreltici etkilerinin devam ettiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- 28. günlük süreçte, 7. gündekine benzer şekilde, %5 uçucu kül katkılı numuneler %9 ve %14 uçucu kül katkılı numunelerden daha fazla ve referans numunelere yakın değerler almaktadır. Bu sonuç, %5 uçucu kül katkılı numunelerde puzolanik özeliğın belirgin bir şekilde kendisini göstermesiyle açıklanabilmektedir.
- 56. günde uçucu kül katkılı numuneler, referans numunelerden daha fazla dayanımlar göstermektedir. Uçucu kül katkılı çimentolarda 56. gün sonunda katkı oranının artmasıyla dayanım artışlarının, puzolanik etkinin görülebilmesi için gerekli serbest kirecin miktarının zamanla artmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ç çimentosu 7. ve 28. günde olduğu gibi çok düşük dayanım değerleri vermektedir. Topçu ve Canbaz [28]'a göre de beton üretiminde uçucu kül kullanmak betonun dayanım özelliklerini iyileştirir.
- S çimentosu hariç diğer çimentolarda uçucu kül katkısı ile dayanım artışı sağlanabilmektedir. Bu sonucun, S çimentosunun analizlerindeki serbest kireç miktarının düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Uçucu kül katkısıyla S ve N çimentolarının dayanımları diğer çimentolardan daha fazla artış göstermektedir. Uçucu kül, rutubetli ortamlarda kalsiyum

iyonları ile reaksiyona girerek silikat hidrate oluşturan yarı kararlı alümin silikatlar içerir. Dolayısıyla kalsiyum iyonu fazla olan çimentolarda daha fazla dayanım artışı görülmektedir.

5.2. FİZİKSEL DENEY SONUÇLARI

- Erken yaşta, uçucu kül katkısı ile tüm numunelerde su emme artmaktadır.
- Erken yaşta su emme, N çimentosunda en yüksek, A çimentosunda en düşük değerde olmakta ve en yüksek N14, L14 numunelerinde, en düşük A0 numunesinde görülmektedir. Birim hacim ağırlıkları, uçucu kül katkısı ve su emme arttıkça, ters orantılı olarak düşmektedir. Bu sonuçla çimentoların fiziksel özelliklerinden, özgül ağırlığı yüksek olan A çimentosunun su emmesi diğer çimentolarınkinden daha düşük, özgül ağırlığı düşük olan N çimentosunun su emmesi diğer çimentolarınkinden daha fazla olmaktadır.
- 28. günde su emme %5 uçucu kül katkılı numunelerin tümünde artmış, %9 uçucu kül katkısı ile N çimentosu hariç diğer çimentolarda azalmış, %14 uçucu kül katkısı ile A çimento hariç diğer çimentolarda ortaya artmıştır. N14 ve L14 numunelerinin su emmesi diğer numunelere nazaran %15 daha fazladır.
- 28. günde su emme, en yüksek N14 numunesinde, en düşük A9 numunesinde görülmektedir.
- 56. günde su emme, %5 uçucu kül katkılı numunelerin hepsinde artmış, %9 uçucu kül katkısı ile S, Ç, A çimentoları hariç diğer çimentolarda artmış, %14 uçucu kül katkısı ile N hariç diğer çimentolarda artmıştır.
- 56. günde su emme, en yüksek N9 numunesinde, en düşük A9 numunesinde görülmektedir.
- Uçucu kül miktarının artmasıyla su emme değerlerinde artış gözlenmektedir. Bu sonucun, kül içindeki uçucu maddelerin ve yanmamış karbon içeren organik

fazların sinterleme esnasında yanmasından ve CO ve CO₂ şeklinde bünyeden uzaklaşmasından, yapıda boşluklar oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonuç, erken yaşta daha belirgin olarak görülmektedir.

- Numune yaşı arttıkça tüm numunelerin su emmesi azalmaktadır. Bu sonuçla, uçucu külün puzolanik etkisinin numune yaşının artması ile etkisini gösterdiği belirlenmektedir.

5.3. DURABİLİTE DENEY SONUÇLARI

- Tüm numunelerde belirgin bir şekilde ağırlık kaybı ve ultrases hızı düşüşü görülmesine karşın %9 uçucu kül katkısı içeren A9, N9, S9 numunelerinde ıslanma – kuruma çevrimleri etkisindeki numunelerde ultrases hızı 56. gün sonunda sırasıyla %3,6, %5,7, %3,7 oranında artış görülmektedir. Bu sonuç, %9 uçucu kül katkılı numunelerde puzolanik özeliğin belirgin bir biçimde kendisini göstermesiyle açıklanabilmektedir. Topçu ve Canbaz [28]'in betonun dayanıklılık özelliklerini incelediği çalışmalarına göre, betonda uçucu kül kullanımının uygun olacağı belirtilmektedir.
- ıslanma – kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde en fazla hasar A14, S14, Ç14 numunelerinde gözlenmektedir.
- ıslanma – kuruma çevrimlerinin olumsuz etkisinin zamanla artması beklenirken 28. günde oluşan hasar beklenenden daha düşük olmaktadır. Bu durum 28 günlük süreçte, hidrasyon hızının, hasarın oluşma hızından daha fazla olduğunu göstermektedir.
- 28 günlük sürecin ardından uçucu kül katkılı çimentolarda, katkı oranı arttıkça ıslanma – kuruma çevrimlerine olan dayanıklılık azalmaktadır.
- ıslanma – kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişimi negatif yönde olmuştur. Ağırlık kaybı Ç5 numunesinde en yüksek, L14 numunesinde en düşüktür.

- Standart küre maruz numunelerde ağırlıkların arttığı gözlenmektedir. En büyük ağırlık değişimi Ç0 numunesinde görülmektedir.
- 28 günlük numune yaşında ultrases hızları bütün uçucu kül içeren numunelerde oldukça yüksek değerlere sahiptir. Bu durum uçucu kül tanelerinin ne kadar iyi doldurma ve paketleme kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir.
- Ultrases hızı, numune yaşı ilerledikçe artmaktadır. Ultrases hızı basınç dayanımı ile de doğru orantılı olarak artmaktadır.
- Erken yaşta, uçucu kül katkı oranı azaldıkça ultrases hızı artmaktadır. Bunun sebebi, 7. günde kısa kür süresinden kaynaklanan yeterli nem miktarı ile birlikte betonun dayanımda önemli bir etkiye sahip olan kalsiyum – silika – hidrat (C - S - H) jelinin oluşumunun en önemli faktörü silikat miktarının uçucu külde fazla olmaması gösterilebilir. Ancak 28. günde farklı oranda uçucu kül katkılarının birbirlerinden düşük veya yüksek değerler aldığı görülmektedir. Buda puzolanik etkinin uzun kür süresinde ortaya çıktığının göstergesi olmaktadır.

Genel Sonuçlar

- Erken yaşlarda, numunelerde uçucu kül katkısının miktarı arttıkça eğilme ve basınç dayanımı kayıpları artmakta ve tüm uçucu kül katkılı numunelerin basınç dayanımları referans numunelerden düşük değerler almaktadır.
- Erken yaşta, en yüksek eğilme ve basınç dayanımı L0 numunesinde görülmektedir. Farklı oranlarda uçucu kül katkısıyla en düşük dayanımları ise Ç çimentosu vermiştir.
- 7 – 28 günlük süreçte N5, N9, Ç9 numuneleri referans numunelerden daha fazla dayanım değerleri almaktadır.
- Uçucu kül katkılı çimentolarda, 28. gün sonunda katkı oranının artmasıyla, dayanım düşüşleri görülmektedir.

- 7. ve 28. günde, %5 uçucu kül katkılı numuneler, %9 ve %14 uçucu kül katkılı numunelerden daha fazla ve referans numunelere yakın değerler almaktadır.
- 56. günde uçucu kül katkılı numuneler, referans numunelerden daha fazla dayanımlar göstermektedir.
- Uçucu kül katkısıyla S ve N çimentolarının dayanımları diğer çimentolardan daha fazla artış göstermektedir.
- Erken yaşta su emme yüzdesi, N çimentosunda en yüksek, A çimentosunda en düşük değerde olmaktadır.
- Özgül ağırlığı yüksek olan A çimentosunun su emme değeri diğer çimentolarinkinden daha düşük, özgül ağırlığı düşük olan N çimentosunun su emme değeri diğer çimentolarinkinden daha fazla olmaktadır.
- Uçucu kül miktarının artmasıyla su emme yüzdelerinde artış gözlenmektedir. Bu sonuç, erken yaşta daha belirgin olarak görülmektedir.
- Numune yaşlarının artmasıyla uçucu kül katkısının su emme oranına etkisi azalmaktadır.
- Tüm numunelerde belirgin bir şekilde ağırlık kaybı ve ultrases hızı düşüşü görülmesine karşın %9 uçucu kül katkısı içeren A9, N9, S9 numuneleride ıslanma – kuruma çevrimleri etkisindeki numunelerde ultrases hızı zamanla artarak 28. gün sonunda pozitif değerlere ulaşmıştır.
- ıslanma – kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde en fazla hasar A14, S14, Ç14 numunelerinde gözlenmektedir.
- ıslanma – kuruma çevrimlerinin olumsuz etkisinin zamanla artması beklenirken 28. günde oluşan hasar beklenenden daha düşük olmaktadır.

- Islanma – kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişimi negatif yönde olmuştur. Ağırlık kaybı Ç5 numunesinde en yüksek, L14 numunesinde düşüktür.
- Standart küre maruz numunelerde ağırlık artışı görülmüştür. En büyük ağırlık değişimi Ç0 numunesinde görülmektedir.
- Ultrases hızı, numune yaşı ile doğru orantılı olarak artmaktadır.
- Erken yaşta, uçucu kül katkı oranı azaldıkça ultrases hızı artmaktadır.
- Betonda uçucu kül kullanımının erken yaşlarda yavaş dayanım kazanılmasına yol açtığı bilinmektedir. Beton teknolojisindeki son gelişmelerden kalsiyum içeriği ve tane boyutu dağılımının dayanım kazanma hızını belirleyen en önemli parametreler olduğu anlaşılmaktadır. Erken yaşta uçucu kül katkısı ile dayanım kaybının, bağlayıcı hamurların priz sürelerinin artması dolayısıyla ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bu olumsuzluk süperakışkanlaştırıcı katkı ile giderilebilmektedir.
- Yüksek oranda uçucu kül kullanımı kütle betonu üretiminde, sıcak havalarda beton dökümünde, taşıyıcı özellikten çok dayanıklılık özeliğinin ön planda tutulduğu deniz yapısı vb. yapılar için tavsiye edilebilir. Sertleşmiş çimento harçlarındaki gözeneklilik ve geçirgenliğin azalması uçucu kül katkısının uygun miktarda kullanımıyla mümkündür. Ancak hızlı mukavemet kazanması istenen yapı elemanlarında kullanılmamalıdır.

İleriye Yönelik Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak ıslanma / kuruma çevrimlerinin harç ve beton üzerindeki etkilerinin daha kapsamlı görülebilmesi için ileride yapılacak olan araştırmalarda aşağıda belirtilen önerileri dikkate almak faydalı olacaktır.

- Islanma-kuruma deneyi sonucunda meydana gelen hasarların belirlenebilmesi için deneyler daha uzun sürdürülmeli, ölçümler daha sık yapılmalıdır. İç yapının değişimi, elektron mikroskobu ve X ışını difraktometrisi ile incelenmelidir.
- Hasar oranlarının karşılaştırılabilmesi için hızlandırılmış dayanıklılık deneyleri ile birlikte doğal şartlara daha yakın uzun süreli deneyler de yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. MEHTA, P.K., 1983, "Pozzolanik and Cementitious by-Products as Mineral Admixtures for Concrete: A Critical Review," The use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete, American Concrete Institute special publication SP-79:, ed. V. M. Malhotra., Detroit:, 1-46
2. GÜNEYİSİ E., ve diğ., 2003, "Katkılı ve Katkısız Çimentolu Betonların Değişik Kür Koşulları Altında Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", *Çimento ve Beton Dünyası*, 45 (4), 56-73
3. BARADAN, B., YAZICI, H., ÜN, H., 2002, "Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)". 282. DEÜ. Müh. Fak. Yayın No: 298, DEÜ., İzmir.
4. AKMAN, M.S., 1990, "Yapı Malzemeleri", T.C İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi Matbaası, İstanbul, Sayı 1408
5. BARADAN, B., YAZICI, H., 2003, "Betonarme Yapılarda Durabilite ve TS EN 206-1 Standardının Getirdiği Yenilikler", *Türkiye Mühendislik Haberleri*
6. TS EN 197-1, 2002, "Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 91.100.10
7. MASSAZA, F., 1997, "Pozzolans and Durability of Concrete", 1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, Turkish Cement Manufacturers' Association, , İstanbul, 1-22
8. HEWLETT P.C., 1998, "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", John Wiley and Sons Inc., Fourth Edition, New York
9. KILINÇKALE, F.M., ÇELİK, K., 2005, "Katki Miktarı, Türünün ve Öğütmenin Çimentonun Dayanım Performansına Etkileri" 2. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, MBGAK, İstanbul
10. ÇELİK, K., "Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu ve Traslı Çimentolarla Üretilen Aynı Mukavemet Sınıfındaki Harçların Dayanım ve Dayanıklılığının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi
11. TOKYAY M., ERDOĞDU T.Y., 2003, "Cüruflar ve Cürüflu Çimentolar", TÇMB/AR-GE, Ankara, 975-8136-03-08
12. YEĞİNOBALI, A. 2003, "Silis Dumani ve Çimento ile Betonda Kullanımı", TÇMB/AR-GE, Ankara, 975-8136-14-3

13. MAZLUM, F., 1989, "Pirinç Kabuğu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi", Doktora Tezi, İTÜ
14. ERDOĞAN, T.Y., 2004, "Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri", Türk Hazır Beton Birliği, İstanbul, 975-92122-1-8
15. GANİ, M.S.J., 1997, Cement and Concrete, Chapman & Hall, London.
16. KOCATAŞKIN, F., 1987, "Yeni Gelişen Beton Malzemeleri", İleri Beton Teknolojisi Ders Notları, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
17. CANPOLAT, F., YILMAZ K., 2002, "Doğal Zeolit ve Uçucu Kül Katkılı ve Katkısız Harçların Sülfat Dayanıklılığı", Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi
18. ARUNTAŞ, H.Y., 2006, "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli", G.Ü Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 21, No 1, 193–203, 2006, Yapı Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Teknikokullar, 06500 Ankara
19. NEVILLE, A.M., 1981, Properties of Concrete, Longman Scientific & Technical, New York.
20. MEHTA, P.K., 1986, Concrete-Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, New Jersey.
21. TOKYAY, M., ERDOĞDU, K., 1993, "Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu", TÇMB, Ankara
22. LANE, R.O., BEST, J.F., 1982, "Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete", Concrete International, V. 4, No: 7, pp. 81–92.
23. GÖKÇE, A., UYAN, M., ÖZTEKİN, E., 1996, "İnceliğe Bağlı Olarak Uçucu Küllü Betonların Su İhtiyacındaki Değişim", 4. Ulusal beton kongresi, İstanbul, s. 209-221, 30-31 Ekim-1 Kasım.
24. ERDOĞAN, T.Y., 1993, "Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Sempozyumu, Ankara, Kasım
25. TOKYAY, M., 1993, "Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi)", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Ankara, Kasım.
26. ASTM C 618, 1991, "Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Puzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete"
27. POSTACIOĞLU, B., 1986, "Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agravalar, Cilt 1; Bağlayıcı Maddeler", Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul

28. TOPÇU, İ.B., CANBAZ, M., 2001, "Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri", Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi
29. BOUZOUBAA, N., ZHANG M.H., MALHOTRA, V.M., 2000, Laboratory Produced High-Volume Fly Ash Blended Cements; Compressive Strength and Resistance to the Chloride-ion Penetration of Concrete, Cem. Concr. Res. 30, 1037–1046.
30. MALHOTRA, V.M., MEHTA, P.K., 2002, High Performance, High Volume Fly Ash Concrete 101 s. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa.
31. YAZICI, H., "Yüksek Hacimde C Sınıfı Uçucu Kül İçeren Betonların Mekanik Özellikleri ve Sülfürik Asit Dayanıklılığı"
32. KOCATAŞKIN, F., 1959, "Beton Teknolojisi", İTÜ Kütüphanesi Sayı:400, s. 58-60.
33. BARADAN, B., 1995, "Kerpiç yapıların korunması için uygun puzolanik karışımlar", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp., Ankara 73-79.
34. DEMİRBAŞ A., ASLAN A., 1999, "Evaluation of Lignite Combustion Residues as Cement Additives", Cem. Concr. Res. V. 29, pp. 983–987.
35. MEHTA P. K., 1986, "Effects of Fly Ash Composition on Sulfate Resistance of Cement". ACI Journal, V. 83, 994–1000.
36. IRASSAR E.F., DÍ MAÍO A., BATİC O.R., 1996, "Sulfate Attack on Concrete with Mineral Admixtures". Cem. Concr. Res. Vol. 26, No. 1, pp. 113–123.
37. NEVİLLE A.M., 1990, "Properties of Concrete Pitman Publishing", Singapore, 443-451.
38. MORTUREUX, B., ve diğ., 1980, "Comparison of Reactivity of the Different Puzzolans", Proceeding of 7th International Congress of Chemistry of Cements, Paris, Vol.4, 110-115
39. AKMAN, M.S., 1992, "Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi", İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Sayı 1481
40. "Betonarme Demirlerinin Korozyonu ve Katodik Koruması 1", 1998, Tüdev İş Dünyası, 2: 39–43.
41. ASAN A., YALÇIN H., 2003, "Uçucu Kül Katkısının Betonarme Demirleri Üzerine Etkisi", G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 16(1):47-54.
42. TOKYAY M., ERDOĞDU K., 1998, "Uçucu Küllerin Karakterizasyonu", TÇMB ARGE/ Y 98.3, Ağustos.

EKLER**EK-A**

Eğilme Dayanımı Deneyi Cihazı

EK-B

(a)



(b)

Basınç Dayanımı Deneyi Cihazı

(a) : Basınç Dayanımı Deneyi Cihazı (Dış Görünüş), (b) : Basınç Dayanımı Deneyi Cihazı (İç Görünüş)

ÖZGEÇMİŞ

Nurullah MERCAN, 27 Nisan 1984'te İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Yıldıztepe İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Bakırköy Sabri Çalışkan Lisesi'nde tamamlayarak 2000 yılında mezun oldu. Aynı yıl öğrenimine başladığı Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında mezun oldu. 2005 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı.