

Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Harçların Özellikleri

Esin Dede

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım, 2008

Properties of Mortars Containing High Volume Fly Ash

Esin Dede

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

November, 2008

Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Harçların Özellikleri

Esin Dede

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ömer Fatih Eser

Kasım, 2008

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Esin Dede'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Harçların Özellikleri” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ömer Fatih ESER

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Hasan GÖNEN

Üye : Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU

Üye : Doç. Dr. Nevzat KIRAÇ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer ARIÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

YÜKSEK ORANDA UÇUCU KÜL İÇEREN HARÇLARIN ÖZELİKLERİ

ESİN DEDE

ÖZET

Yapılan çalışmada Çayırhan Park Termik Santral A.Ş.'den elde edilen uçucu kül, Lâdik Akçansa Çimento Fabrikasından elde edilen çimento, Kırklareli Pınarhisar Set Çimento Fabrikasından elde edilen kum ile farklı oranlarda kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin özellikleri incelenmiştir. Önce TS EN 196-1'e uygun olarak şahit numune hazırlanmış olup diğer numunelerin oranları şahit numunedeki çimentonun hacimce yüzdesine bağlı olarak belirlenmiştir. Tüm numunelerin birim ağırlıkları, eğilme ve basınç dayanımları bulunmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, uçucu kül miktarı arttırılıp çimento miktarı azaltıldıkça eğilme ve basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER

Uçucu kül, çimento, termik santral, harç, eğilme dayanımı, basınç dayanımı

PROPERTIES OF HIGH VOLUME MORTARS CONTAINING FLY ASH

ESİN DEDE

SUMMARY

In the study, the properties of samples which were prepared by using various rates of fly ash from Çayırhan Park Termik Santral A.Ş. , cement from Ladik Akçansa Cement Factory sand and from Kırklareli Pınarhisar Set Cement Factory, were examined. First a sample is prepared in accordance with TS EN 196-1 and then the other prepared samples with different percentages of cement and fly ash are compared with the control sample. Unit weights, bending and compressive strengths of all samples were tested. As a conclusion of the experiments it was observed that bending and compressive strengths were reduced as the amount of fly ash was increased and the amount of cement was decreased.

KEY WORDS

Fly ash, cement, plant, mortar, bending strength, compressive strength

TEŞEKKÜR

Gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım **Yrd. Doç. Dr. Ömer Fatih ESER**'e, deneysel çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Amasya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Mehmet Ali SELVİ ve laboratuvar çalışanlarına, çalışmalarında kullandığım uçucu külün temininde bana yardımcı olan Çayırhan Park Termik Santral A.Ş. yetkililerine, portland çimentosu temininde yardımcı olan Lâdik Akçansa Çimento Fabrikası yetkililerine, standart kum temininde yardımcı olan Kırklareli Pınarhisar Set Çimento Fabrikası yetkililerine ve her zaman yanımda olan ve hiçbir şeyi esirgemeyen aileme teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. PUZOLANİK MALZEMELERİN TANIMI VE GENEL SINIFLARI	2
2.1. Uçucu Küller	4
2.1.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması	5
2.1.2. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri	5
2.1.3. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları	6
2.1.4. Uçucu küllerin minerolojik	8
2.1.5. Uçucu küllerin beton katkı maddesi olarak kullanılabildiğine dair standartların belirttiği değerler	10
2.2. İnşaat Sektöründe Uçucu Kül Kullanımı	12
2.2.1. Betonda uçucu kül kullanımı	13
2.2.2. Çimentoda uçucu kül kullanımı	17
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	18
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	18

3.1.1. Çimento	18
3.1.2. Uçucu kül	18
3.1.3. Kireç	19
3.1.4. Kum (CEN referans kumu)	20
3.1.5. Su	21
3.2. Numunenin Mekanik Özeliği	21
3.2.1. Eğilme dayanım deneyi	22
3.2.2. Basınç dayanım deneyi	24
4. HARÇ ÜRETİMİ	25
5. DENEY SONUÇLARI	29
5.1. Harç Numunelerinin Eğilme Dayanımları	29
5.2. Harç Numunelerinin Basınç Dayanımları	33
5.3. Harç Numunelerinin Birim Ağırlıkları	36
5.4. Normal Suda ve %30 Oranında Tuz İçeren Tuzlu Suda Kür Edilen Harç Numunelerinin Eğilme ve Basınç Dayanımları	37
5.5. Normal Suda Kür Edilen Harç Numunelerinin Donma - Çözülme Deneyi	41
6. SONUÇLAR	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Pozolanların sınıflandırılması	2
3.1. CEN referans kumu	20
3.2. Eğilme dayanım deneyi	23
4.1. Harç sıkıştırma işlemi	28
5.1. Eğilme dayanım deneyi	29
5.2. Ağırlıkça %0'dan başlayıp %40'a kadar uçucu kül içeren harç numunelerinin eğilme dayanımları (MPa)	31
5.3. Ağırlıkça %5 oranında kireç ve %50'den başlayıp %90'a kadar uçucu kül içeren harç numunelerinin eğilme dayanımları (MPa)	32
5.4. Ağırlıkça %0'dan başlayıp %40'a kadar uçucu kül içeren harç numunelerinin basınç dayanımları (MPa)	34
5.5. Ağırlıkça %5 oranında kireç ve %50'den başlayıp %90'a kadar uçucu kül içeren harç numunelerinin basınç dayanımları (MPa)	35
5.6. Normal suda ve tuzlu suda kür edilen harç numunelerinin eğilme dayanımları	38
5.7. Normal suda ve %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür sonucu harç numunelerinin basınç dayanımları (MPa)	40
5.8. Donma – çözülme deneyi sonucu harç numunelerinin eğilme dayanımları	43
5.9. Donma-çözülme deneyi sonucu harç numunelerinin basınç dayanımları	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

2.1. Türkiye’de kömürle çalışan termik santraller	4
2.2. ASTM’ye göre uçucu kül sınıfları	5
2.3. Türkiye’de bulunan bazı termik santrallerdeki uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları	7
2.4. Türkiye bulunan bazı termik santrallerdeki uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları	9
2.5. Uçucu küller ile ilgili Türk Standartları	10
2.6. Uçucu küllerin beton katkı maddesi olarak kullanılabilmeleri için gereken kimyasal değerler	11
2.7. Uçucu küllerin beton katkı maddesi olarak kullanılabilmeleri için gereken fiziksel değerler	11
2.8. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanlar	12
2.9. Uçucu külün numune özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri	14
3.1. Portland çimentosu kimyasal bileşenleri	18
3.2. Çayırhan Park Termik Santrali uçucu kül kimyasal analiz sonuçları	19
3.3. Çayırhan Park Termik Santrali uçucu kül fiziksel analiz sonuçları	19
3.4. CEN referans kumunun tanecik büyüklük dağılımı	21
3.5. Normal betonun çeşitli özellikleri	22
4.1. Harç numunelerinin ağırlıkça karışım miktarları (kg/m^3)	25
4.2. Harç numunelerinin ağırlıkça karışım oranları (%)	26
4.3. %5 oranında kireç içeren harç numunelerinin ağırlıkça karışım miktarları (kg/m^3)	27
4.4. %5 oranında kireç içeren harç numunelerinin ağırlıkça karışım oranları (%)	27
5.1. 7 ve 28 günlük harç numunelerinin eğilme dayanımları (MPa)	30
5.2. %5 oranında kireç içeren 7 ve 28 günlük harç numunelerinin eğilme dayanımları	30

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)**Cizelge****Sayfa**

5.3. 7 ve 28 günlük harç numunelerinin basınç dayanımları (MPa)	33
5.4. %5 oranında kireç içeren 7 ve 28 günlük harç numunelerinin basınç dayanımları	33
5.5. Harç numunelerinin birim ağırlıkları (gr/cm^3)	36
5.6. Normal suda ve %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür edilen numunelerin eğilme dayanımları (MPa)	37
5.7. Normal suda ve %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür sonucu numunelerin eğilme dayanımları (MPa)	39
5.8. Donma-çözülme deneyi sonucu harç numunelerinin eğilme dayanımları	42
5.9. Donma-çözülme deneyi sonucu harç numunelerinin basınç dayanımları	44

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
b	Numune genişliği
F_c	Kırılmadaki en büyük yük
F_f	Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),
G	Gün
gr	Gram
kg	Kilogram
kN	Kilo Newton
l	Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık
maks.	Maksimum
MPa	Mega Paskal
N	Newton
NH	Normal Harç
P	Kuvvet
R_c	Basınç dayanımı
R_f	Eğilme dayanımı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UKH	Uçucu Küllü Harç
vb.	Ve benzeri
μm	Mikro metre
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece

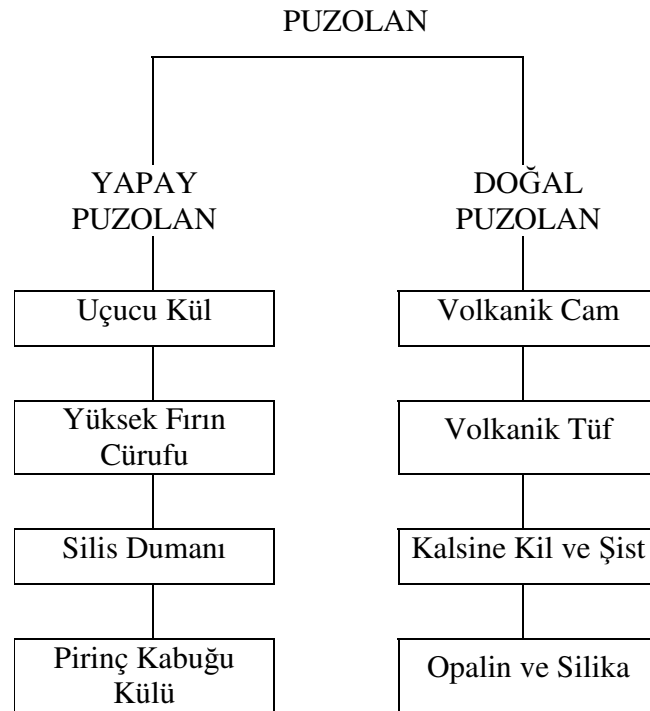
1. GİRİŞ

“*Portland çimentosu*”, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmeleri ile ortaya çıkan ve "klinker" olarak adlandırılan malzemenin alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilen bir üründür. Çimento, bağlayıcı özeliğe sahip bir malzemedir. Çimentonun sağlayabileceği bağlayıcılık özeliği, bu malzemenin su ile birlikte karılması sonucu elde edilmektedir. Çimento ile suyun oluşturduğu malzeme "*çimento hamuru*" olarak adlandırılmaktadır. Çimento hamuru ve ince agrega karışımından oluşan malzemeye "*harç*", harç ile iri agreganın oluşturduğu malzemeye ise "*beton*" denilmektedir. Bu çalışmada farklı oranlarda çimento, uçucu kül, kum ve su kullanılarak harç numuneleri elde edilecektir.

Çimento üretiminin çevreye verdiği zarar azımsanmayacak kadar yüksektir. Aynı zamanda çimento üretimi fazla miktarda enerji gerektirir. Bu gibi nedenlerle, günümüzde çimentonun çeşitli puzolanik malzemelerle yer değiştirilerek hem daha ekonomik, hem de çevreye karşı daha duyarlı bir yapı malzemesi üretimi hızla artan bir ilgi görmektedir. (Erdoğan, 2003). “*Puzolan*”, tek başına bağlayıcılık özeliği olmayan, ancak, ince öğütülüp normal sıcaklıktaki nemli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özeliği gösteren malzeme olarak tanımlanır. En çok kullanılan puzolan çeşidi uçucu küldür. Bu malzeme termik santralleri içinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir. Uçucu kül, nemli ortamlarda kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrate oluşturan yarı kararlı alümin silikatlar içerir (Yazıcı, 2005). Yapılan çalışmada, harç karışımında kullanılan çimentonun belirli oranlarda uçucu kül ile yer değiştirilerek, üretilen harç numunelerinin özelliklerine uçucu külün etkisi araştırılmıştır. Harç numunelerin hazırlanmasında 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında dikdörtgen prizmatik deney numuneleri kullanılmıştır.

2. PUZOLANİK MALZEMELERİN TANIMI VE GENEL SINIFLARI

Puzolanlar ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özeliğine sahip olan silisli ya da silisli ve alüminli malzemelerdir. Puzolanlar reaktif silisyum dioksit ve alüminyum oksitten oluşmuştur. Geri kalan bölüm demir oksit ve diğer oksitleri içerir. Reaktif SiO_2 miktarı %25'ten az olmamalıdır (Çelik ve Kılınçkale, 2005). Puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal ve yapay olarak iki grupta sınıflandırılabilirler (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Puzolanların sınıflandırılması

Puzolanların beton ve harç özelliklerine etkileri aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Yazıcı, 2005).

1. Numunedeki çimento miktarında azaltma yapılabilir.
2. Karışım suyu ihtiyacında artma söz konusudur. Ancak uçucu küller azalmaya neden olabilir.
3. İşlenebilme artar, ayrışma ve terleme azalır.
4. Donma-çözülme direnci erken yaşlarda azalır.
5. Dayanım kazanma hızı azalır. İleri yaşlardaki dayanımlar yüksek olur.
6. Alkali-agrega reaksiyonunun zararları azalır.
7. Hidratasyon ısısı azalır.
8. Rötire genellikle artar.

2.1. Uçucu Küller

Türkiye’de elektrik enerjisi termik santrallerden elde edilmektedir. Termik santrallerin çoğunda yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006). Türkiye’de kömürle çalışan termik santral isimleri, yaktıkları kömür cinsi ve kurulu güçleri Çizelge 2.1.’de verilmiştir. Pulverize kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektrofiltreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Atık malzeme olarak ortaya çıkan bu küllerin yaklaşık %75-%80’i, gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince tanelerdir. En yaygın puzolan, uçucu küldür. Endüstriyel bir atık olan ve uçabilen bu küllere “*uçucu kül*” denilmektedir (Erdoğan, 1993). Bu işlem sırasında daha iri taneli olan ve baca gazları ile birlikte atmosfere sürüklenemeyerek kazan tabanına düşen küllere de “*taban külü*” adı verilmektedir.

Bacadan dışarı çıkacak uçucu küllerin birtakım elektrostatik veya elektromekanik yollarla tutulması ve kül toplayıcı silolara kanalize edilmesi ile günümüzün çok önemli

problemlerinden biri olan hava ve toprak dolayısı ile çevre kirliliği de kısmen önlenmiş olmaktadır. Uçucu küllerde çok yüksek miktarlarda yer alan oksitler SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 ’dür. Bunların yanı sıra, bir miktar CaO , MgO , C (çok ince taneli durumda olan yanmamış kömür) ve Na_2O ’da bulunabilmektedir. Uçucu küllerin %60-%90’ı amorf durumdadır. Geri kalan bölümünde mullit, kuvars, magnetit, hematit gibi kristaller yer alabilmektedir (Erdoğan, 1993).

Çizelge 2.1. Türkiye’de kömürle çalışan termik santraller

No	Santral Adı	Yakıt Cinsi	Kurulu Güç (MW)	Bulunduğu İl
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çatalağzı	Taşkömürü	300	Zonguldak
5	Çayırhan	Linyit	620	Ankara
6	Çolakoğlu	Taşkömürü	190	Kocaeli
7	Kangal	Linyit	457	Sivas
8	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
9	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
10	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
11	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
12	Sugözü-İskenderun	İthal kömür	1210	Adana
13	Tunçbilek	Linyit	429	Kütahya
14	Yatağan	Linyit	630	Muğla
15	Yeniköy	Linyit	420	Muğla

2.1.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması

Uçucu kül yapay puzolan sınıfına giren atık bir malzemedir. Uçucu küller silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, oluşan hidrasyon sonucu portland çimentosunda olduğu gibi C-S-H jellerinin oluşmasını sağlar ve hidrolik bağlayıcı özellik kazanırlar. Bu nedenle, uçucu küller hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadır. Uçucu küller kimyasal kompozisyonlarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Uçucu küller içerdiği 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.

Çizelge 2.2. ASTM'ye göre uçucu kül sınıfları

Sınıf	Tanım
F	SiO+AlO+FeO, antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilmektedir ve puzolanik özeliğe sahiptir.
C	SiO+AlO+FeO, linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilmektedir ve puzolanik özeliğin yanı sıra kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özeliğe sahiptir.

2.1.2. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri, genel olarak termik santralde yakılan kömürün özelliklerine ve yanma sistemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Renkleri açık griden koyu griye doğru uzanan değişikliktedir. Daha çok miktarda karbon içeren küller

koyu gri renkte, daha çok demir içerenler ise açık gri renktedir. Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli parçacıklardır, boyutları 1–150 μm arasında değişiklik göstermektedir. Ortalama yoğunlukları 2.1–2.7 g/cm^3 'tür. Uçucu kül inceliği, puzolanik aktiviteyi önemli ölçüde etkiler. İnceliğini arttırmak için uçucu kül elenebilir, hava kullanılarak iri ve ince taneler ayrılabilir veya öğütme yapılabilir. Uçucu külün öğütülmesiyle birlikte yoğunluk ve incelik değişmektedir. Öğütme sonucu aşağıdaki fiziksel değişimler oluşmaktadır:

1. Uçucu külün inceliği azalmaktadır.
2. Uçucu kül tanelerinin porozitesinin azalması sonucunda özgül ağırlıkta önemli bir artış olmaktadır.
3. Öğütmeden önce küresel şekle sahip uçucu kül taneleri öğütme sonucu şekilsiz taneler haline gelmektedir.

Puzolanik reaksiyon, uçucu kül tanesinin yüzeyinde başlar. İncelik arttırılırsa puzolanik aktivite de artar. Ayrıca, betonda en zayıf halka olan agrega-çimento hamuru ara yüzeyinin özelliklerinin iyileştirilmesi için de uçucu kül inceliği önemlidir. Uçucu küllerin ekonomik olarak değerlendirilmesi kullanılabilir miktara, gerekli nakliye miktarına ve istenen tasarıma bağlıdır. Uçucu kül hidrasyon ısını düşürür ve tanelerin küreselliği sayesinde taze betonun kararlılığını, kolay yerleşmesini ve kolay sıkıştırılmasını sağlar (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

2.1.3. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları

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 uçucu kül*", %10'un üstünde olan uçucu küller ise "*yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu uçucu kül*" olarak isimlendirilmektedir.

Türkiye’de elde edilen bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları TS 639 ve ASTM C 618 sınır değerleri ile birlikte Çizelge 2.3.’te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Türkiye’de bulunan bazı termik santrallerdeki uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları

Oksitler	Çayırhan	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	TS 639 sınırları	ASTM C 618 Sınırları	
						F	C
SiO ₂	49.13	27.4	56.8	58.59	-	-	-
Al ₂ O ₃	15.04	12.8	24.1	21.89	-	-	-
Fe ₂ O ₃	8.25	5.5	6.8	9.31	-	-	-
S+A+F	72.42	45.7	87.7	89.79	> 70	> 70	> 50
CaO	1.7	47.0	1.4	4.43	-	-	-
MgO	4.76	2.5	2.4	1.41	< 5	< 5	< 5
Na ₂ O	2.2	(N+K) 0.3	(N+K) 0.3	0.24	-	< 1.5	< 1.5
K ₂ O	1.76	-	-	1.81	-	-	-
SO ₃	4.30	6.2	2.9	0.41	< 5	< 5	< 5
Kızdırma Kaybı	0.52	2.4	0.6	1.39	< 10	< 12	< 6

Uçucu küller yapısındaki kireç ve SO₃ miktarına göre ise üç grupta toplanmaktadır.

1. Aktif bileşeni silisli veya alümina silikatlı cam olup, bitümlü kömürden elde edilen, "SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃" S+A+F toplamı %70’in üzerinde olan uçucu küller,

2. Genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı %50 ile %70 arasında olan ve kireç ile silika miktarı yüksek olan siliko kalsik uçucu küller,

3. Aktif bileşen kalsiyum alümino silikattır ve linyit kömürünün yanması ile elde edilen, S+A+F toplamı %50'nin üzerinde olan ve diğerlerine göre daha fazla SO_3 ve CaO içeren uçucu küllerdir (Erdoğan, 2003).

Uçucu küller ASTM C 618'e göre de iki başlık altında toplanmaktadır. Bunlar:

1. Bitümlü kömürden elde edilen ve S+A+F toplamı %70'in üzerinde olan F sınıfı uçucu küller,

2. Genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı %50'nin üzerinde olan C sınıfı uçucu küllerdir.

2.1.4. Uçucu küllerin minerolojik yapıları

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden daha çok mineralojik yapıları ile ilgilidir. Düşük kireçli uçucu küllerin ana aktif bileşeni silis ve alüminadan 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 alüminat, amorf silis ve alümina nedeni ile kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özeliğe sahip olabilirler. Düşük kireçli uçucu küllerdeki camsı faz miktarı, yüksek kireçli uçucu küllerden daha fazladır. Düşük kireçli uçucu küllerde mineral faz olarak camsı faz, mullit ($Al_6Si_2O_{13}$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_2O_4), kuvarz (SiO_2) vb. var iken, yüksek kireçli uçucu küllerde bunlara ek olarak serbest kireç (CaO), anhidrit ($CaSO_4$), trikalsiyum alüminat ($Ca_3Al_2O_6$), plajiyoklaz, feldspat gibi kalsiyum silikatlar bulunmaktadır

(Erdoğan, 2003). Türkiye’deki bazı uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları Çizelge 2.4.’te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Türkiye’de bulunan bazı termik santrallerdeki uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları

Mineral	Uçucu Kül					
	Afşin-Elbistan	Çayırhan	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1.0	18.1	1.2	4.3	8.8	6.0
Kuvartz	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	1.5	5.5	9.8	0.9	1.0
Plajiyoklaz	~28	-	~15	~20	-	~25
Camsı ve Amorf faz	~30	~70	~50	~50	~70	~35

Uçucu küller puzolanik içeriğine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır:

Sınıf 0: Puzolanik indeksi %70-%94 arasındaki küller için özgül yüzeyin düşük olduğu (2500–3500 cm²/g) yani tanelerin iri olduğu ve cam içeriğinin düşük olduğu (< %60) küllerdir. Bu küllerin betonun su ihtiyacını arttırdığı belirtilmektedir.

Sınıf I: Pozolanik indeksi %95-%114 arasındaki küllerin portland çimentosu ile aynı inceliğe sahip olmasına karşın, karışımın işlenebilirliğini etkilemediği ya da biraz arttırdığı belirtilmektedir. Bunların özgül yüzeyleri genellikle $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dan büyük küllerdir.

Sınıf II: Bunların pozolanik indeksleri %115'ten büyüktür. Bunların tane şekli küreseldir ve portland çimentosundan incedir. Özgül yüzeyleri $4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dır (Atış, 2000).

2.1.5. Uçucu küllerin beton katkı maddesi olarak kullanılabildiğine dair standartların belirttiği değerler

Türk Standartları Enstitüsü uçucu kül ile ilgili 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 Çizelge 2.5.'te verilmiştir. TS 640, AB'ye uyum çerçevesinde yürürlükten kaldırılmış ve yerine TS EN 197-1 "Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar" standardı uygulamaya konulmuştur. Çizelge 2.6. ve Çizelge 2.7.'de ise TS 639, TS EN 450 ve ASTM C 618 numaralı standartlarda yer alan fiziksel ve kimyasal özellikler verilmiştir (Türker vd, 2003).

Çizelge 2.5. Uçucu küller ile ilgili Türk Standartları

Standart No	Standardın Adı	Açıklamalar
TS 639	Uçucu Küller – Çimentoda Kullanılan	Tarifler, özellikler ve uygunluk kriteri
TS 640	Uçucu Küllü Çimento	Fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve deney metotları
TS EN 450	Uçucu kül – Betonda kullanım için	Tarifler, özellikler ve uygunluk kriteri
TS EN 451-1	Uçucu kül – Deney metodu – Bölüm 1	Serbest kalsiyum oksit içeriğinin tayini
TS EN 451-2	Uçucu kül – Deney metodu – Bölüm 2	Islak eleme ile incelik tayini

Çizelge 2.6. Uçucu küllerin beton katkı maddesi olarak kullanılabilirmeleri için gereken kimyasal değerler

	TS 639	TS EN 450	ASTM C 618	
			F sınıfı	C sınıfı
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70	-	70	50
SO_3 , maks. %	5.0	3.0	5.0	5.0
Nemlilik, maks. %	3.0	-	3.0	3.0
Kızdırma kaybı, maks. %	10.0	5.0	6.0	6.0
MgO, maks. %	5.0	-	-	-
Na_2O olarak alkaliler, maks. %	1.5	-	1.5	1.5
Cl^- , maks. %	-	0.1	-	-

Çizelge 2.7. Uçucu küllerin beton katkı maddesi olarak kullanılabilirmeleri için gereken fiziksel değerler

	TS 639	TS EN 450	ASTM C 618	
			F sınıfı	C sınıfı
İncelik: 45 μm göz açıklıklı elek üzerinde kalan miktar, maks. %	-	40	34	34
Özgül yüzey, min. cm^2/g	3000	-	-	-
Dayanım Aktivite İndeksi: min. %,	70	75* (85)**	75	75
Su ihtiyacı: Kontrol örneğine oranla, maks. %	-	-	105	105

*28 gündeki

**90 gündeki

2.2. İnşaat Sektöründe Uçucu Kül Kullanımı

1970’li yıllarda başlayan petrol krizinin ardından enerji kullanımını azaltmaya ve alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar artarak devam etmiştir. Türkiye’de uçucu kül üretimi ve kullanımı 1960’lı yıllarda başlamıştır. Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri incelendiğinde, bunların inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabileceği, malzeme ve enerji üretiminde ekonomi sağlanırken diğer taraftan da çevre kirliliğinin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunması da olasıdır (Ünal ve Uygunoğlu, 2004). İnşaat sektöründe uçucu kül; çimento, beton, agrega, kerpiç, tuğla, gazbeton ve yalıtım malzemesi üretiminde, baraj ile yol yapımında ve geoteknik uygulamalarda kullanılmaktadır. Türkiye ve Dünyada uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanlar Çizelge 2.8.’de özetlenmiştir. Türkiye’de uçucu kül genel olarak çimento ve tuğla üretimi ile baraj yapımında kullanılmaktadır. Avrupa’da ise uçucu kül ağırlıklı olarak beton, hafif beton blok ve gazbeton üretiminde kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006).

Çizelge 2.8. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanlar (Aruntaş, 2006)

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

2.2.1. Betonda uçucu kül kullanımı

İnşaat sektöründe uçucu külün çimento ile birlikte en çok kullanıldığı alanlardan biri, beton üretimidir. Uçucu kül, hem normal ve hafif betonda hem de kullanımı hızla artan hazır beton üretiminde gerek katkı, gerekse ikame (yerine koyma) malzemesi olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül, ön üretim ve ön gerilmeli beton elemanların yapımında da kullanılmaktadır. 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 dayanım ve dayanıklılığında artışlar elde edilmektedir (Erdoğan, 2003). Yüksek miktarda C sınıfı uçucu külün kullanıldığı bir çalışmada, daha iyi kalitede ve daha ekonomik beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Yüksek miktarda uçucu külün betondaki performansının uzun süreli olarak incelendiği diğer bir çalışma, uçucu külün taşıyıcı beton uygulamaları ile sülfat ve klorür etkisine maruz kalan ortamlarda kullanılabileceğini göstermiştir (Şengül vd, 1996).

Yapılan deneysel bir araştırma sonucunda uçucu külün polimer beton üretiminde de kullanılabileceği belirlenmiştir (Türk vd, 2006). Beton karışımında hafif iri agrega olarak sinterlenmiş uçucu külün kullanıldığı bir çalışmada, betonarme kirişler üretilmiş ve kirişler üzerinde yapılan deneylerde uygun sonuçlar elde edilmiştir (Türker vd, 2003). Uçucu külün olumlu bir etkisi de betonarme çeliği üzerinedir. Beton karışımında uçucu kül kullanılması durumunda betonarmede donatı korozyonunun azaldığı deneysel olarak belirlenmiştir (Postacıoğlu, 1987). Uçucu kül küresel yapısı nedeniyle betonun işlenebilme özeliğini iyileştirmekte, taze betonda terlemeyi (su kusmayı) azaltmakta, betonun hidrasyon ısını azaltarak sıcak havalarda kütle betonu dökümüne olanak sağlamakta, puzolanik reaksiyon sayesinde betonun uzun dönemli dayanımına katkıda bulunmakta, betonun geçirimsizliğini 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. Beton ve harç katkı maddesi olarak kullanılan uçucu külün numune özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri Çizelge 2.9.' da belirtilmiştir (Erdoğan, 2003).

Çizelge 2.9. Uçucu külün numune özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri (Erdoğan, 2003)

Olumlu Etkileri	Taze betondaki işlenebilmeyi arttırmaktadır.
	Betonun hidratasyon ısisını azaltmaktadır.
	Sertleşmiş betonun sülfatlara dayanıklılığını arttırmaktadır.
	Taze betondaki terlemeyi azaltmaktadır.
	Sertleşmiş betonun su geçirimliliğini azaltmaktadır.
	Ekonomiklik sağlamaktadır.
Olumsuz Etkileri	Betonun prizini geciktirmektedir; bu durum soğuk havalarda sorun olabilmektedir.
	Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızı azalmaktadır.
	Betonun daha uzun süre ile kür edilmesi gerekmektedir.
	Betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok miktarda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmasını gerektirmektedir.

Karışımın Su İhtiyacı: Sabit bir çökme değeri elde edebilmek için uçucu kül içeren karışımın ihtiyacı olan su miktarı, genellikle katkısız betonunkinden daha az olmaktadır. Kül taneciklerinin küresel şekilli olmaları daha az sürtünmeye neden olduğundan, beton karışımının su ihtiyacı da azalmaktadır. Uçucu kül içeren betonların su ihtiyacı, uçucu külün inceliğine ve kullanıldığı miktara bağlı olarak değişmektedir. İncelik arttıkça su ihtiyacı da artmaktadır.

İşlenebilme: Uçucu kül içeren betonların işlenebilmesi, katkısız betonlarınkinden daha iyi olmaktadır. Bunun iki nedeni vardır:

1. Uçucu külün yoğunluğu portland çimentosunun yoğunluğundan daha azdır. O nedenle puzolanik beton yapımı için çimento ağırlığının bir bölümünün yerine uçucu kül kullanıldığında, betondaki bağlayıcı hamurun hacmi artmaktadır. Daha büyük hacme sahip bağlayıcı hamur, taze betondaki agrega tanelerinin arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır.
2. Uçucu kül taneleri küresel şekillidir. Küresel şekilli tanecikler iç sürtünmeyi azaltmakta, betonun akıcılığını artırmaktadır.

Priz Süresi: Uçucu kül katkılı betonlarda yer alan portland çimentosu miktarı, katkısız betondakine göre daha azdır. Uçucu kül katkılı betonların priz süreleri, katkısız betondakinden daha uzun olmaktadır. Uçucu kül katkılı betonun priz süresi, kullanılan uçucu külün tipine ve inceliğine göre değişmektedir. C tipi uçucu küller, F tipi uçucu küllerden daha kısa priz süresi göstermektedir.

Hidratasyon ısısı: Uçucu kül katkılı betonlarda daha az portland çimentosu yer aldığından, bu tür betonların hidratasyon ısıları, katkısız betondakinden daha az olmaktadır.

Terleme: Beton karışımındaki ince taneli maddelerin artması, katı tanelerin yüzey alanlarının artmasına yol açmaktadır. Bu durumda katı taneler beton karışımının

içerisindeki suyu kendilerine daha iyi bağlamakta ve terlemeyi azaltmaktadır. İnceliği yüksek olan uçucu kül içeren betonlardaki terleme, katkısız betonlardakinden daha azdır.

Dayanım: Katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılması beton dayanımına etkileri, ince taneli doğal puzolanların etkisine benzemektedir. İlk zamanlarda, uçucu küllü betonun dayanımı katkısız beton dayanımına oranla biraz daha az olmaktadır, ancak, nihai dayanım oldukça fazladır. İlk günlerdeki dayanım artışı, uçucu külün inceliğine ve tipine göre değişmektedir. C tipindeki uçucu küllerin dayanıma katkısı F tipindekilerden daha fazladır. İncelik arttıkça ilk zamanlardaki dayanım daha yüksek olmaktadır.

Betonun Su Geçirirliiği: Uçucu kül kullanılan betonların su geçirirliiği, katkısız betondakinden daha azdır. Betonda geçirirlilik; bağlayıcı malzeme miktarına, su içeriğine, agrega ve tane dağılımı, kür koşulları gibi değişkenlere bağlıdır. Uçucu küller puzolanik özellikleri nedeniyle oluşturdıkları C-S-H jelleriyle kalsiyum hidroksitin dışarı çıkma riskini azaltır ve geçirirliiği de azaltmış olur. Uçucu kül sadece su geçirimsizliğini sağlamakla kalmaz, gaz geçirirliiğini (O_2 , CO_2 , Cl) de büyük oranda iyileştirir.

Sülfatlara Dayanıklılık ve Alkali-Agrega Reaksiyonu: Uçucu küllü betonların sülfatlara dayanıklılığı, katkısız betonunkine oranla daha fazladır. Bu tür betonlarda alkali-agrega reaksiyonu da daha az miktarda yer alabilmektedir. Bunun nedeni uçucu küllü betonlarda daha az miktarda portland çimentosu kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Betonun Ekonomikliiği: Uçucu küller portland çimentosuna oranla çok daha ucuz olan atık malzemelerdir. Katkısız betondakine oranla daha az portland çimentosunun yer aldığı uçucu küllü betonların daha ekonomik olduğu görülmektedir (Erdoğan, 2003).

2.2.2. Çimentoda uçucu kül kullanımı

İnşaat sektöründe uçucu külün yaygın olarak kullanıldığı alanların başında çimento sanayisi gelmektedir. 1980’li yıllardan itibaren Türkiye’de katkılı çimentoların çimento üretimindeki payı %90’ların üzerine çıkmıştır. Uçucu küllerin çimentoda hammadde, katkı maddesi ve ikame malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir. Uçucu kül, çimentonun ana hammaddeleri olan kil ve kalkere hammadde olarak karıştırılmasıyla klinker üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu kül çimentoda katkı olarak kullanıldığında enerji tasarrufu sağlanmakta ve daha ucuz çimento elde edilmektedir. 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 2800 cm²/g değerinden büyük ya da yaklaşık olarak eşit bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar uçucu küllerin öğütme işlemi yapılmadan doğrudan çimento üretiminde ya da üretim sonrası ikame yöntemi ile çimentonun bir bölümü yerine kullanılabileceğini göstermektedir.

Çimento üretimi sırasında çok büyük miktarda doğal hammadde ve enerji tüketimi yapılmakta ve atmosfere CO₂ gazı çıkmaktadır. Bu nedenle çimento üretiminde uçucu kül kullanılması ile doğal çevrenin bozulması ve enerji tüketimi azalacağı gibi havadaki CO₂ miktarı da azalacağı için küresel ısınmanın enaza indirilmesi olasıdır. Bu durumda enerji tasarrufu sağlandığından çimento maliyetinin de azalması söz konusudur. Türkiye’de ve Dünyada uçucu küllü çimentolar ve bu çimentoların özellikleri ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Türkiye’de 1980 yılına kadar çimento üretiminde kullanılan toplam uçucu kül miktarı yaklaşık olarak 40.000 tondur (Ün, 2005).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Çimento

Yapılan çalışmada CEM I 42.5 portland çimentosu kullanılmış olup, Lâdik Akçansa Çimento Fabrikasından elde edilmiştir. Kullanılan portland çimentosunun özgül ağırlığı 3.04'tür. Harç karışımında çimento kullanılması ile numunelerin kalıp ve priz alma sürelerinin uygun seviyeye çekilmesi ve erken dayanımlarda artış amaçlanmıştır. Portland çimentosunun kimyasal özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir. CEM I 42.5 portland çimentosu klinkerinin bir miktar alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen bir çimento türüdür.

- Portland çimentosu klinkeri, mekanik dayanım için,
- Alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) priz düzenleyici olarak, kullanılır.

Çizelge 3.1. Portland çimentosu kimyasal bileşenleri

Oksitler	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl^-	Kızdırma kaybı (%)
CEM I 42.5	20	3.6	5.1	63.2	1.1	2.8	0.8	0.3	0.03	2.8

3.1.2. Uçucu kül

Yapılan çalışmada kullanılan uçucu kül, Ankara'da bulunan Çayırhan Park Termik Santralinden elde edilmiştir. Özgül ağırlığı 2.30'dur. Çayırhan Park Termik Santrali

üretim yan ürünü olan uçucu külün TSE 639 standardına göre yapılan analiz sonuçları Çizelge 3.2. ve Çizelge 3.3.'te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çayırhan Park Termik Santrali uçucu kül kimyasal analiz sonuçları

	Nem (%)	Kızdırma Kaybı (%)	SO₃ (%)	Cl⁻ (%)	Serbest CaO (%)
Aranılan Değer	max. %3.0	max. %10.0	max. %5.0		
Bulunan Değer	0.27	0.52	4.30	0.0071	1.7

Çizelge 3.3. Çayırhan Park Termik Santrali uçucu kül fiziksel analiz sonuçları

Özgül Ağırlık	2.30
Tane Boyutu (+45 mikron) (%)	44.04

Uçucu küllerin ekonomik olarak değerlendirilebilmesi kullanılabilir miktara, gerekli nakliye miktarına ve istenilen tasarıma bağlıdır. Uçucu kül hidrasyon ısısını düşürür ve tanelerin küreselliği sayesinde karışımın kararlılığını, kolay yerleşmesini ve kolay sıkıştırılmasını sağlar. Uçucu külün kimyasal bileşimi, tane boyut dağılımı, inceliği, puzolanik aktivitesi ve numunelerin kür koşulları uçucu kül içeren numunenin mekanik özelliklerini etkileyen önemli etkenlerdir.

3.1.3. Kireç

Kireç, bilinen en eski bağlayıcı maddedir. Kireç, kireç taşının çeşitli derecelerde (850°C–1450°C) pişirilmesi sonucu elde edilen, suyla karıştırıldığında ya da havada katılaşma özeliği gösteren, beyaz renkli, inorganik esaslı bağlayıcı madde türüdür. Yapılan

çalışmada, hava kireci kullanılmıştır. Karışımda kireç kullanılması ile karışımın bağlayıcılığını kaybetmemesi ve uçucu kül-kireç puzolanik reaksiyonu sonucu ilerleyen yaşlarda da numune basınç dayanımında artış amaçlanmıştır. Hava kireci (yağlı kireç) kullanılmasının avantajları şunlardır:

1. Hava kireci (yağlı kireç) kullanılarak çok iyi plastik harç elde edilebilir. İşlenebilirliği yüksektir.
2. Hava kireci kullanılarak üretilen harçların plastiklikleri fazladır. Şekil değiştirme yapabilme yeteneğinin fazla olması nedeni ile duvar sıvaları için uygundur.
3. Kireç harçlarının taş ve tuğla gibi yapı malzemelerine daha iyi yapışma özellikleri vardır.

3.1.4. Kum (CEN referans kumu)

Kırklareli’nde bulunan Set Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Trakya Çimento Fabrikası’ndan elde edilen TS EN 196–1 Madde 5.1.2’de belirtilen özelliklerde 1350 ± 5 gram ağırlığında plastik torbalarda korunan CEN referans kumu kullanılmıştır. Şekil 3.1.’de paketlenmiş CEN referans kumu ve Çizelge 3.4.’te CEN referans kumunun tanecik büyüklük dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.1. CEN referans kumu

Çizelge 3.4. CEN referans kumunun tanecik büyüklük dağılımı (Akakın, 2006)

Kare göz açıklığı (mm)	Kümülatif elekte kalan (%)
2.00	0
1.60	7 ± 5
1.00	33 ± 5
0.50	67 ± 5
0.16	87 ± 5
0.08	99 ± 1

3.1.5. Su

Su, numune karışımını oluşturan temel malzemelerden biridir. Numune üretiminde kullanılacak karışım suyunun kalitesi ve miktarı numune özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Karışım suyu asit niteliğinde olmamalıdır. Sülfat ve değişik tuz gibi, numuneye zarar verebilecek kimyasal maddeleri içermemelidir. Yapılan çalışmada temiz, içilebilir, berrak ve kokusuz olan içme suyu kullanılmıştır.

3.2. Numunenin Mekanik Özeliği

Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla eğilme ve basınç dayanımları belirlenmelidir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımından oldukça fazla çıkmaktadır. Malzeme seçiminde, uygulanacak olan yüklere karşı malzemenin gösterdiği direnç göz önünde bulundurulması gereken en önemli özelliklerden birisidir. Dayanım, malzemenin kırılma alabileceği en yüksek gerilme olarak tanımlanır. Beton numunesi basınç yükleri altında daha iyi davranış gösterdiğinden, betonun dayanımından söz edildiğinde diğer dayanımlar belirtilmemişse basınç dayanımı anlaşılır.

Hesaplarda çoğunlukla betonun 28 günlük basınç dayanımını dikkate alınır. Dayanım, standart ortam koşullarında (sıcaklık ve nem) tutulan standart boyutlardaki numunelerle ve standart deney yöntemleri kullanılarak belirlenir. Yapılarda çoğunlukla normal dayanımlı (28 günlük basınç dayanımı 20–40 MPa) betonlar kullanılır. Son yıllarda beton teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak 120 MPa basınç dayanımına sahip betonları ticari olarak üretmek olasıdır. Burada ana hatları ile tanımlanmış olan bilgiler Çizelge 3.5.'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Normal betonun özellikleri

Basınç dayanımı	30 MPa
Eğilme dayanımı	5 MPa
Çekme dayanımı	3 MPa
Elastisite modülü	25000 MPa
Poisson oranı	0.20
Isıl genleşme katsayısı	$10 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}$
Yoğunluk	2300 kg/m ³

3.2.1. Eğilme dayanım deneyi

Yapılan çalışmada 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutundaki dikdörtgen prizmatik harç numunelerinin eğilme dayanımları üç noktadan yüklemeli deney ile belirlenmiştir. TS EN 196-1'e göre eğilme dayanımı deneyinde dikdörtgen prizma şeklinde hazırlanan numuneler deney cihazında birbirinden yaklaşık 100 mm uzaklıkta iki silindirik mesned üzerine yerleştirilmiştir. Harç numunesinin tam ortasına gelecek şekilde, numunenin üst kısmına yerleştirilen bir silindir üzerine de numune kırılıncaya kadar çizgisel P yükü ile yükleme yapılmıştır. Bulunan kırılma yükünden eğilme dayanımı hesaplanmıştır.



Şekil 3.2. Eğilme dayanım deneyi

Üç nokta eğilme deneyi 100 mm açıklıkta uygulanmış ve kırılma yükü okunduktan sonra eğilme dayanımı $\delta_{eğ}$, MPa olarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\delta_{eğ} = \frac{1,5 F_f x l}{b^3} \quad (3)$$

Burada;

$\delta_{eğ}$ = Eğilme dayanımı (MPa)

b = Numune genişliği (mm),

F_f = Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

l = Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm)'dir.

Not: Elde edilen eğilme dayanımı değerleri MPa olarak verilmiştir.

Üç harç numunesi için ayrı ayrı bulunan sonuçların aritmetik ortalaması alınarak numunenin eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Eğilme dayanım deneyi sonucu iki parçaya ayrılan prizmatik numuneler, basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Eğilme yüküne maruz kalan numunede yer alan kırılmaya, harç numunesinin tarafsız ekseninin altında oluşan çekme gerilmeleri neden olmaktadır. Bunun nedeni, harç numunesinin oldukça

düşük çekme dayanımına sahip olmasıdır. Bu nedenle, numunelerin eğilme dayanımı değeri gerçekte harç numunesinin çekme dayanımını göstermektedir.

3.2.2. Basınç dayanım deneyi

Yapılan çalışmada 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlu üç adet harç prizması eğilme dayanım deneyine tabi tutulduklarında, numunelerin ortadan kırılmalarıyla 6 adet, yaklaşık 40 mm x 40 mm x 80 mm boyutlu, yine prizma şekilli yarım numuneler ortaya çıkmıştır. İki parçaya ayrılan her yarım prizmanın TS EN 196-1'e uygun olarak alt ve üst yüzeylerine 40 mm x 40 mm metal kırma başlığı yerleştirilmiş ve numuneler deney presinde yan yüzeylerinden yükleme ile kırılmaya tabi tutulmuştur. Yarım prizmalar cihazın plakaları arasına ± 0.5 mm'den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek ve prizmanın arka yüzü plakadan 10 mm taşacak şekilde uzunlamasına yerleştirilmiştir.

Eğilme dayanım deneyi sonucu iki parçaya ayrılan harç numunelerinin basınç dayanımı R_c , aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Altı adet prizmatik yarım harç numunesi üzerinde yapılan deneylerde ayrı ayrı bulunan sonuçların aritmetik ortalaması hesaplanmış ve basınç dayanımı bulunmuştur.

$$\delta_{basınç} = \frac{F_c}{1600} \quad (4)$$

Burada;

$\delta_{basınç}$ = Basınç dayanımı (MPa)

F_c = Kırılmadaki en büyük yük (N),

1600 = Plakaların (40 mm x 40 mm) alanı (mm²)'dir.

Not: Elde edilen basınç dayanım değerleri MPa olarak verilmiştir.

4. HARÇ ÜRETİMİ

İlk olarak hazırlanan deneyde; CEM I 42.5 portland çimentosu, TSE 639'a göre F tipi düşük kireç içerikli uçucu kül, CEN referans kumu ve su kullanılarak beş adet harç karışımı üretilmiştir. Üretilen tüm karışımlarda su ile kum miktarı sabit tutulmuştur. Uçucu külün çimento ile yer değiştirilmesi hacimce %0'dan başlayarak %40'a kadar %10'luk adımlarla yapılmıştır. Malzeme oranları şahit numunedeki (NH) çimento hacmi esas alınarak belirlenmiştir. Üretilen harçlar NH, UKH 10, UKH 20, UKH 30, UKH 40 şeklinde isimlendirilmiştir. Burada NH; uçucu kül içermeyen şahit numune (normal harç), UKH; uçucu kül içeren harçları göstermektedir. UKH'den sonra gelen iki rakam ise karışımdaki %0'dan %40'a kadar değişen uçucu kül yüzdesini göstermektedir. Çizelge 4.1.'de üretilen harç numuneleri gr cinsinden; Çizelge 4.2.'de ise harç karışım oranları yüzde (%) cinsinden verilmektedir.

Çizelge 4.1. Harç numunelerinin ağırlıkça karışım miktarları (gr)

Karışımın Adı	Çimento (gr)	Uçucu Kül (gr)	Su (gr)	CEN Referans Kumu (gr)
NH	450	0	225	1350
UKH 10	405	34.05	225	1350
UKH 20	360	68.1	225	1350
UKH 30	315	102.13	225	1350
UKH 40	270	136.17	225	1350

Çizelge 4.2. Harç numunelerinin ağırlıkça karışım oranları (%)

Karışımın Adı	Çimento (%)	Uçucu Kül (%)	Su (gr)	CEN Referans Kumu (gr)
NH	100	0	225	1350
UKH 10	90	10	225	1350
UKH 20	80	20	225	1350
UKH 30	70	30	225	1350
UKH 40	60	40	225	1350

Harç numuneleri TS EN 196–1 standardına göre üretilmiş olup, öncelikle, 450 gr CEM I 42.5 portland çimentosu, CEN referans kumu ve 225 gr su kullanılarak şahit numune (NH) hazırlanmıştır. Daha sonra, şahit numunedeki çimentonun hacimce yüzdesine bağlı olarak diğer numunelerin oranları belirlenmiştir. Karışımlardaki çimento oranı ağırlıkça %100'den başlayıp %60'a kadar azaltılırken, uçucu kül oranı ağırlıkça %0'dan başlayıp %40'a kadar yükseltilmiştir.

Karışımındaki çimento oranı %60 ve uçucu kül oranı %40 seviyesine geldiğinde, harç karışımındaki çimento miktarının azalması sonucu numunelerin bağlayıcılığını kaybetmemesi amacıyla karışıma %5 oranında kireç katılarak, ikinci deney numuneleri hazırlanmıştır. Böylece karışımındaki uçucu kül oranı hacimce %50 ve çimento oranı hacimce %45'te iken karışıma hacimce %5 oranında kireç katılmış ve çimento oranı %5, uçucu kül oranı ise %90'a gelene kadar karışımındaki kireç miktarı %5 oranında sabit tutulmuştur. Bu şekilde hazırlanan beş adet harç numuneleri ise UKH 50, UKH 60, UKH 70, UKH 80, UKH 90 şeklinde isimlendirilmiştir. Çizelge 4.3.'de üretilen harç numuneleri kg/m^3 cinsinden, Çizelge 4.4.'te ise harç karışım oranları yüzde (%) olarak verilmektedir.

Çizelge 4.3. %5 oranında kireç içeren harç numunelerinin ağırlıkça karışım miktarları (gr)

Karışımın Adı	Çimento (gr)	Uçucu Kül (gr)	Kireç (gr)	Su (gr)	CEN Referans Kumu (gr)
UKH 50	202.5	170.22	18.1	225	1350
UKH 60	157.5	204.27	18.1	225	1350
UKH 70	112.5	238.3	18.1	225	1350
UKH 80	67.5	272.35	18.1	225	1350
UKH 90	22.5	306.4	18.1	225	1350

Çizelge 4.4. %5 oranında kireç içeren harç numunelerinin ağırlıkça karışım oranları (%)

Karışımın Adı	Çimento (%)	Uçucu Kül (%)	Kireç (%)	Su (gr)	CEN Referans Kumu (gr)
UKH 50	45	50	5	225	1350
UKH 60	35	60	5	225	1350
UKH 70	25	70	5	225	1350
UKH 80	15	80	5	225	1350
UKH 90	5	90	5	225	1350

Harç numuneleri hazırlanırken, karıştırma kabına önce bir miktar su konulmuş olup, daha sonra çimento ve uçucu kül eklenerek bir süre karıştırma işlemi yapıldıktan sonra kum katılmış ve homojen bir karışım elde edilmiştir. Hazırlanan harç 40 mm x 40 mm x 160 mm yağlanmış prizmatik deney kalıplarına önce yarısına kadar doldurulup standart sarsma makinesinde 60 sarsma ile sıkıştırılmış, daha sonra kalıbın tamamı doldurularak tekrar sarsma makinesinde 60 sarsma ile sıkıştırma işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 4.1. Harç sıkıştırma işlemi

Şekil 4.1.'de yarıya kadar harç ile doldurulmuş deney kalıbının sıkıştırma işlemi için sarsma cihazına yerleştirildiği görülmektedir. Sıkıştırma işleminden sonra kalıp başlığı çıkarılmış ve harcın fazlası mala ile testere hareketi yapılarak sıyrılmıştır. Harç prizmalarının yüzeyi düzleştirildikten sonra etiketlenen numuneler priz alana kadar rutubetli laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Uçucu kül kullanılan harç numunelerinin priz alma süresi, şahit numuneye göre daha uzundur. Harç karışımındaki uçucu kül miktarı arttıkça numunelerin priz alma süreleri de artmıştır. Prizini alan numunelerden kireç katılmayanların kürü suda, kireç katılan numunelerin kürü ise laboratuvar ortamında havada yapılarak eğilme ve basınç deneylerinin yapılacağı güne kadar bekletilmiştir.

5. DENEY SONUÇLARI

5.1. Harç Numunelerinin Eğilme Dayanımları

40 mm x 40 mm x 160 mm ayrıtlı dikdörtgen prizmatik harç numunelerin üç noktada eğilme dayanım deneyi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Eğilme dayanım deneyi

Çizelge 5.1.’den de görüldüğü gibi ilk beş deneyde hiç kireç kullanılmamış olup, çimento oranı hacimce %100’den başlayıp %60’a kadar düşürülmüş, uçucu kül oranı ise hacimce %0’dan başlayıp %40’a kadar arttırılmıştır. Karışımda bulunan çimento oranı azalıp, uçucu kül oranı arttıkça harç numunelerinin eğilme dayanımlarında azalma gözlenmiştir. Sonraki beş deneyde ise kireç oranı hacimce %5 seviyesinde sabit tutulmuş ve çimento oranı hacimce %45’ten başlayarak %5’e kadar azaltılırken, uçucu kül oranı hacimce %50’den başlayıp %90’a kadar arttırılmıştır. Bu şekilde hazırlanan numunelerin de eğilme dayanımlarının gittikçe azaldığı gözlenmiştir (Çizelge 5.2.). Tüm karışımlarda

su ile kum miktarı sabit tutulmuş olup ayrıca bir akışkanlaştırıcı kullanılmasına gerek kalmamıştır.

Çizelge 5.1. 7 ve 28 günlük harç numunelerinin eğilme dayanımları (MPa)

Karışımın Adı	Eğilme Dayanımı (7G-MPa)	Eğilme Dayanımı (28G-MPa)
NH	6.08	7.25
UKH 10	4.91	6.60
UKH 20	4.56	5.52
UKH 30	3.74	4.70
UKH 40	3.51	4.17

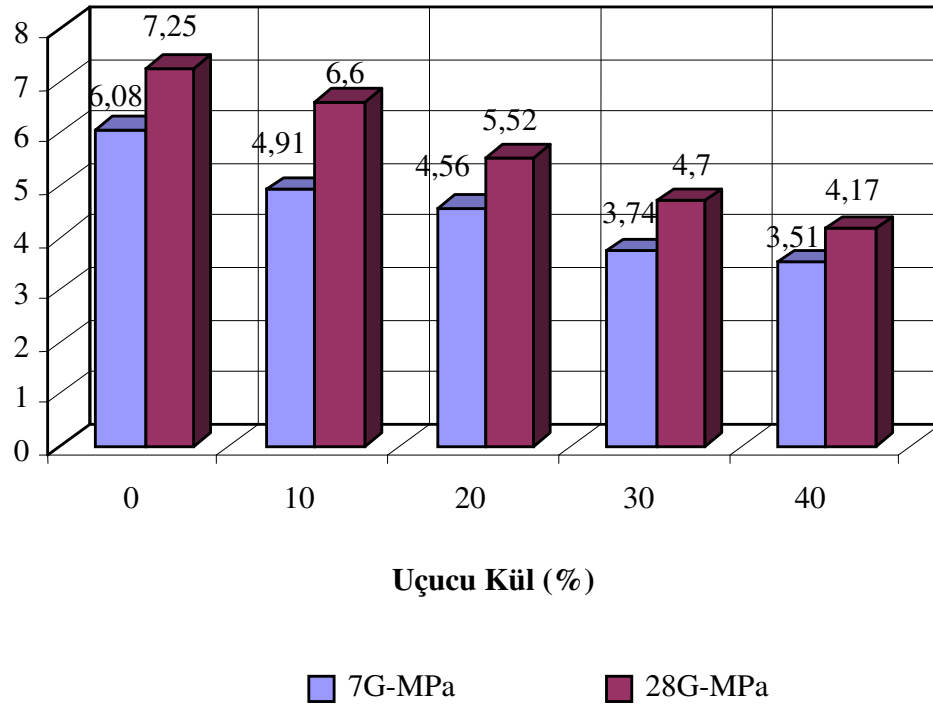
Çizelge 5.2. %5 oranında kireç içeren 7 ve 28 günlük harç numunelerinin eğilme dayanımları (MPa)

Karışımın Adı	Eğilme Dayanımı (7G-MPa)	Eğilme Dayanımı (28G-MPa)
UKH 50	2.58	3.09
UKH 60	2.34	2.64
UKH 70	1.87	2.3
UKH 80	1.17	1.27
UKH 90	0.71	1.07

7 ve 28 günlük harç numunelerin eğilme dayanımları incelenmiş ve şahit numunenin (NH) eğilme dayanımının farklı oranlarda uçucu kül, çimento kullanılan numuneler ile farklı oranlarda uçucu kül, çimento ve sabit %5 oranında kireç kullanılan numunelerden

daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, uçucu külün harç numunelerinin ilk günlerdeki dayanımını düşürdüğünü açıkça göstermektedir. Karışımlardaki uçucu kül oranı arttıkça numunelerin eğilme dayanımları düşmektedir.

Eğilme Dayanımı (MPa)

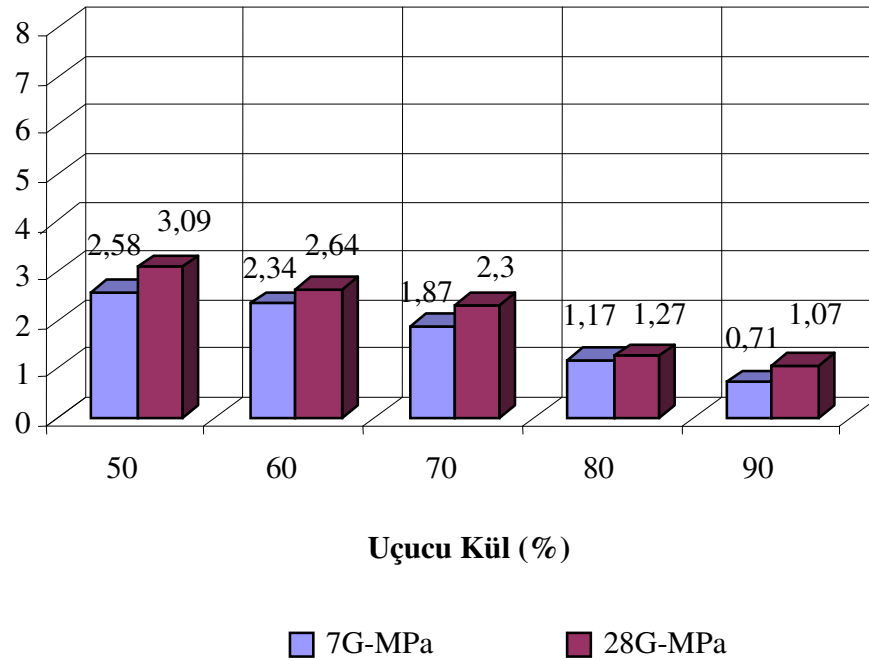


Şekil 5.2. Ağırlıkça %0'dan başlayıp %40'a kadar uçucu kül içeren harç numunelerinin eğilme dayanımları (MPa)

Deney sonuçları incelendiğinde örneğin; 28 gün süre ile kür işlemine tabi tutulan şahit numunenin eğilme dayanımı 7.25 MPa iken, %40 oranında uçucu kül içeren UKH 40 numunesinin eğilme dayanımı 4.17 MPa'a düşmüştür. %5 oranında kireç içeren harç numunelerinde de karışımlardaki uçucu kül oranı arttıkça eğilme dayanımlarının düştüğü

gözlenmiştir. Örneğin; UKH 50 numunesinin 28 günlük eğilme dayanım değeri 3.09 MPa iken, UKH 90 numunesinin eğilme dayanımı 1.07 MPa'a düşmüştür. Bunun yanı sıra tüm numunelerde 28 günlük eğilme dayanımlarının 7 günlük eğilme dayanımlarına oranla arttığı gözlenmiştir. 7 ve 28 günlük eğilme dayanım sonuçlarına göre şahit numunenin 28 günlük eğilme dayanım değerindeki artış %19.24 iken, UKH 20 numunesindeki artış %21.05 oranındadır. %5 oranında kireç kullanılan UKH 70 numunesindeki artış ise %22.99'dur. Bu durum, uçucu kül kullanılan numunelerde ilk günlerdeki dayanımın düşük olmasına karşın ilerleyen yaşlarda eğilme dayanımının arttığını göstermektedir. Numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarındaki değişim Şekil 5.2 ile Şekil 5.3'te grafik çizim olarak gösterilmiştir.

Eğilme Dayanımı (MPa)



Şekil 5.3. Ağırlıkça %5 oranında kireç ve %50'den başlayıp %90'a kadar uçucu kül içeren harç numunelerinin eğilme dayanımları (MPa)

5.2. Harç Numunelerinin Basınç Dayanımları

40 mm x 40 mm x 160 mm ayrıtlı prizmatik numuneler eğilme dayanım deneyi sonunda iki parçaya ayrılmıştır. Bu parçalar üzerinde yapılan basınç dayanım deneyleri sonucunda elde edilen 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri Çizelge 5.3. ile Çizelge 5.4.'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. 7 ve 28 günlük harç numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

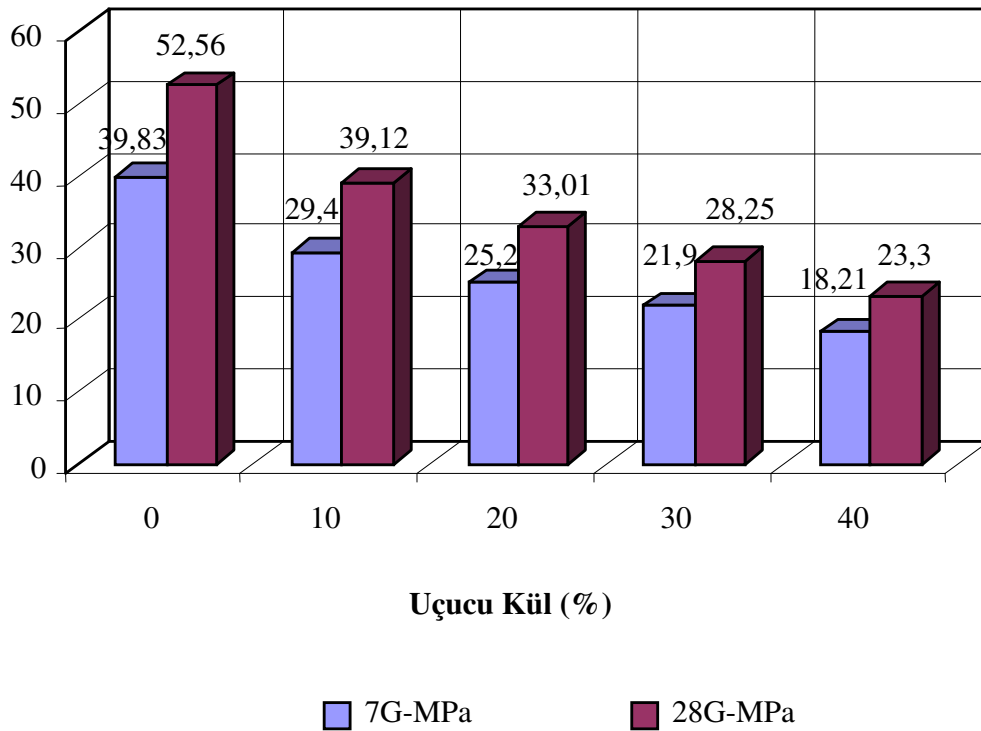
Karışımın Adı	Basınç Dayanımı (7G-MPa)	Basınç Dayanımı (28G-MPa)
NH	39.83	52.56
UKH 10	29.40	39.12
UKH 20	25.20	33.01
UKH 30	21.90	28.25
UKH 40	18.21	23.30

Çizelge 5.4. %5 oranında kireç içeren 7 ve 28 günlük harç numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

Karışımın Adı	Basınç Dayanımı (7G-MPa)	Basınç Dayanımı (28G-MPa)
UKH 50	9.4	13.86
UKH 60	5.4	8.79
UKH 70	3.6	5.23
UKH 80	1.59	2.24
UKH 90	1.06	1.22

Harç numunelerinin basınç dayanım sonuçları, eğilme dayanım deneyinde gözlenmiş olduğu gibi harç üretiminde kullanılan çimento miktarı azaldıkça numunelerin basınç dayanım değerleri de azalma göstermiştir. Uçucu kül ve kireç kullanılmayan şahit numunenin 28 günlük basınç dayanım değeri 52.56 MPa iken, %40 oranında uçucu kül içeren UKH 40 numunesinin 28 günlük basınç dayanım değerinin 23.30 MPa'a kadar düştüğü gözlenmiştir. Bunun yanı sıra karışıma %5 oranında kireç katılması sonucu, %50 oranında uçucu kül içeren UKH 50 numunesinin 28 günlük basınç dayanımı 13.86 MPa iken yine %5 oranında kireç içeren UKH 90 numunesinin 28 günlük basınç dayanımının 1.22 MPa olduğu görülmüştür.

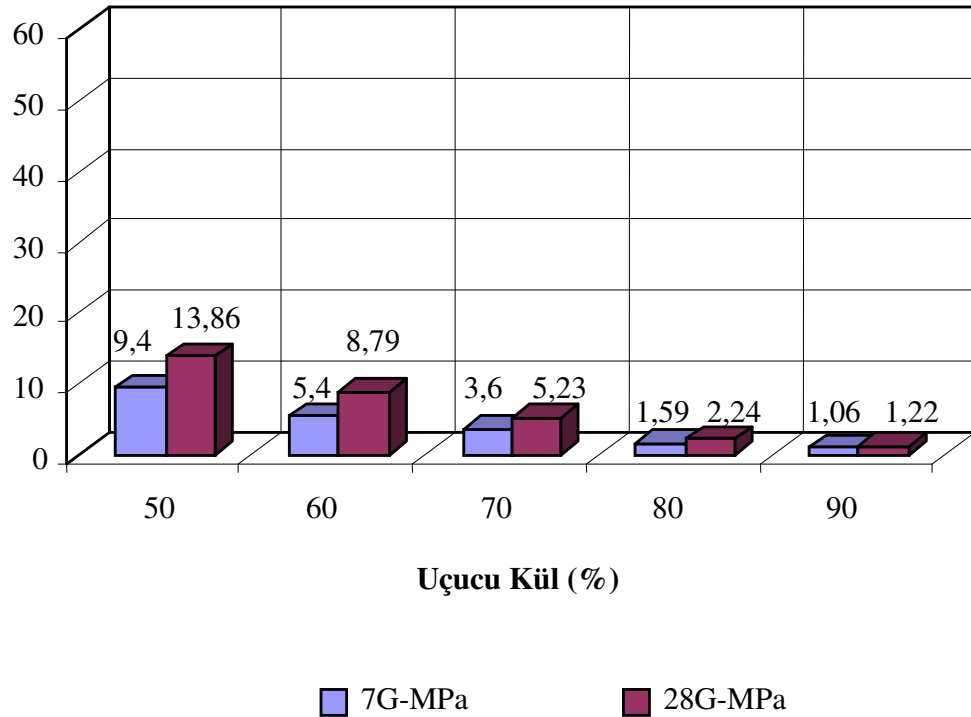
Basınç Dayanımı (MPa)



Şekil 5.4. Ağırlıkça %0'dan başlayıp %40'a kadar uçucu kül içeren harç numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

Eğilme dayanımında olduğu gibi basınç dayanım sonuçlarına göre de uçucu kül içeren karışımların ilk günlerdeki dayanımları düşük olmasına karşın ilerleyen yaşlarda basınç dayanımlarının arttığı gözlenmiştir. Örneğin; UKH 40 numunesinin 7 günlük basınç dayanımı 18.21 MPa iken, 28 günlük basınç dayanımının 23.30 MPa'a yükseldiği görülmüştür. Numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde şahit numunenin 28 günlük basınç dayanımı %31.96 oranında artarken, UKH 10 numunesindeki basınç dayanım değişimi % 33.06 oranındadır. Buradan da görüldüğü gibi karışımda uçucu kül kullanılması numunelerin ilk günlerdeki dayanımlarını düşürmesine karşın ilerleyen yaşlarda basınç dayanımları artmıştır. Numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında ortaya çıkan değişim grafik çizim olarak Şekil 5.4. ile Şekil 5.5.'de verilmiştir.

Basınç Dayanımı (MPa)



Şekil 5.5. Ağırlıkça %5 oranında kireç ve %50'den başlayıp %90'a kadar uçucu kül içeren harç numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

5.3. Harç Numunelerinin Birim Ağırlıkları

Harç numunesinin birim ağırlığının düşük ya da yüksek oluşu numuneyi oluşturan malzeme özelliklerine ve numune içerisinde yer alan boşluk miktarına bağlıdır. Numune içindeki boşluklu yapı, harç numunelerinin su emme oranlarına göre belirlenmiştir. Çizelge 5.5.'de prizmatik harç numunelerinin su/bağlayıcı oranları ve sertleşmiş haldeki birim ağırlıkları görülmektedir. Çimento miktarının azalması ve uçucu kül miktarının artmasıyla birlikte karışımın yoğunluğu azalmış, böylece numunelerin su/bağlayıcı oranları artma, birim ağırlıklarında ise azalma gözlenmiştir.

Çizelge 5.5. Harç numunelerinin birim ağırlıkları (gr/cm³)

Karışımın Adı	Uçucu Kül (%)	Çimento (%)	Kireç (%)	Kum (gr)	Su (gr)	Su / Bağlayıcı	Birim Ağırlık (gr/cm ³)
NH	0	100	0	1350	225	0.5	2.20
UKH 10	10	90	0	1350	225	0.51	2.18
UKH 20	20	80	0	1350	225	0.52	2.11
UKH 30	30	70	0	1350	225	0.54	2.10
UKH 40	40	60	0	1350	225	0.55	2.09
UKH 50	50	45	5	1350	225	0.57	2.04
UKH 60	60	35	5	1350	225	0.59	1.98
UKH 70	70	25	5	1350	225	0.6	1.97
UKH 80	80	15	5	1350	225	0.62	1.96
UKH 90	90	5	5	1350	225	0.64	1.93

5.4. Normal Suda ve %30 Oranında Tuz İçeren Tuzlu Suda Kür Edilen Harç Numunelerinin Eğilme ve Basınç Dayanımları

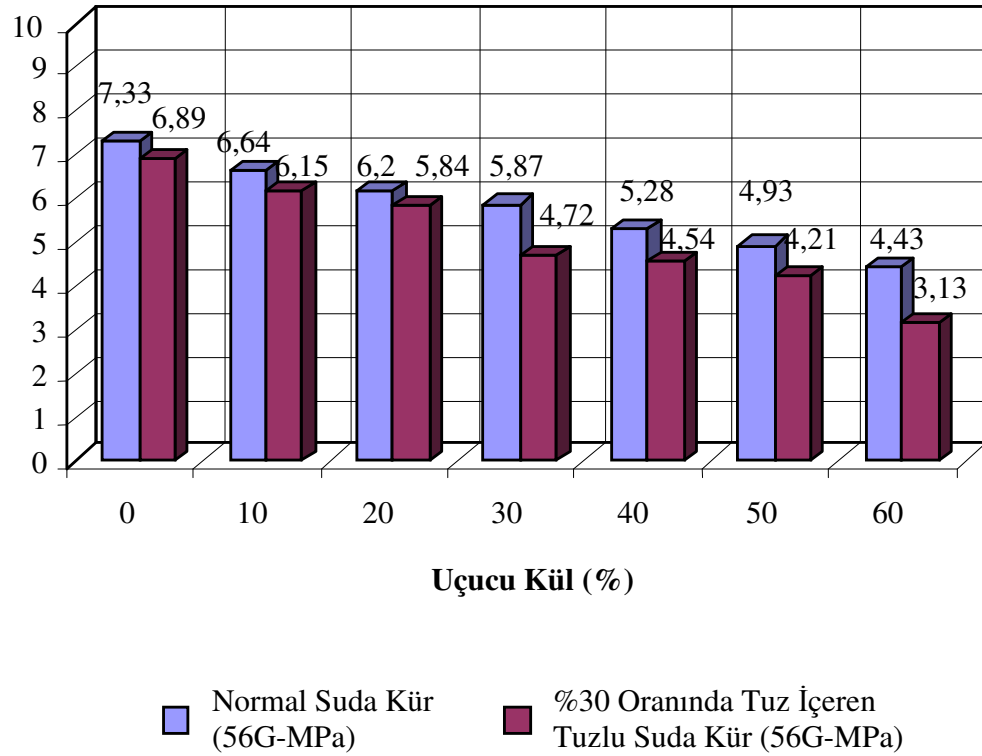
Harç numunelerinin bir kısmı yukarıda anlatıldığı gibi hazırlanıp deneyleri yapıldıktan sonra, uçucu kül içeren harç numunelerinin normal suda ve %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür edilmesi ile uzun sürede kazandığı dayanımı ve bu süre sonunda donma-çözülme etkisinde bırakılan numunelerin dayanımlarında meydana gelen değişimi gözlemlemek amacıyla diğer bir deney yapılmıştır. Bu çalışmada 56 gün boyunca kür işlemine tabi tutulan harç numunelerinin eğilme-basınç dayanımları belirlenmiştir. Hazırlanan deney için karışımlardaki çimento oranı hacimce %100'den başlayıp %40'a kadar azaltılırken, uçucu kül oranı hacimce %0'dan başlayıp %60'a kadar arttırılmıştır. Karışımındaki uçucu kül oranının daha fazla arttırılmamasının nedeni, numune dayanım sonucu elde edilemediği içindir. Bu çalışmada hiç kireç kullanılmamıştır. Hazırlanan harç numuneleri NH2, UKH2 10, UKH2 20, UKH2 30, UKH2 40, UKH2 50, UKH2 60 şeklinde isimlendirilmiştir.

Çizelge 5.6. Normal suda ve %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür edilen numunelerin eğilme dayanımları (MPa)

Karışımın Adı	Uçucu Kül (%)	Çimento (%)	Kum (gr)	Su (gr)
NH2	0	100	1350	225
UKH2 10	10	90	1350	225
UKH2 20	20	80	1350	225
UKH2 30	30	70	1350	225
UKH2 40	40	60	1350	225
UKH2 50	50	50	1350	225
UKH2 60	60	40	1350	225

Her bir karışımdan en kesiti 40 mm x 40 mm ve uzunluğu 160 mm olan deney kalıpları ile 9 adet harç numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar normal suda kür, %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür ve normal suda kür sonucu donma-çözülme deneyine tabi tutulacak harç numuneleri içindir. Tuzlu suda kür sonucu harç numunelerinin yüzeyine tuz kristallerinin çöktüğü görülmüştür. Tuzlu su etkisine maruz kalan numuneler gözeneklerine biriken tuz kristallerinin neden olduğu basınç nedeni ile genişip yıpranabilmektedirler. Çizelge 5.6.'da harç numunelerinin normal suda ve %30 oranında tuz içeren tuzlu suda 56 günlük kür sonucunda elde edilen eğilme dayanım sonuçları görülmektedir.

Eğilme Dayanımı (MPa)



Şekil 5.6. Normal suda ve tuzlu suda kür edilen harç numunelerinin eğilme dayanımları

56 gün süre ile %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür sonucu, numunelerin eğilme dayanımları normal suda kür edilen numunelere göre örneğin; şahit numunede %6.38, UKH 10 numunesinde %7.96 oranında azalma gözlenmiştir. Karışımdaki uçucu kül oranı arttıkça, %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür sonucu numunelerin eğilme dayanımlarında meydana gelen düşüşte artmaktadır. Şekil 5.6.'da normal suda ve %30 oranında tuz içeren tuzlu suda 56 gün boyunca kür edilen numunelerin eğilme dayanım sonuçları grafik olarak verilmiştir.

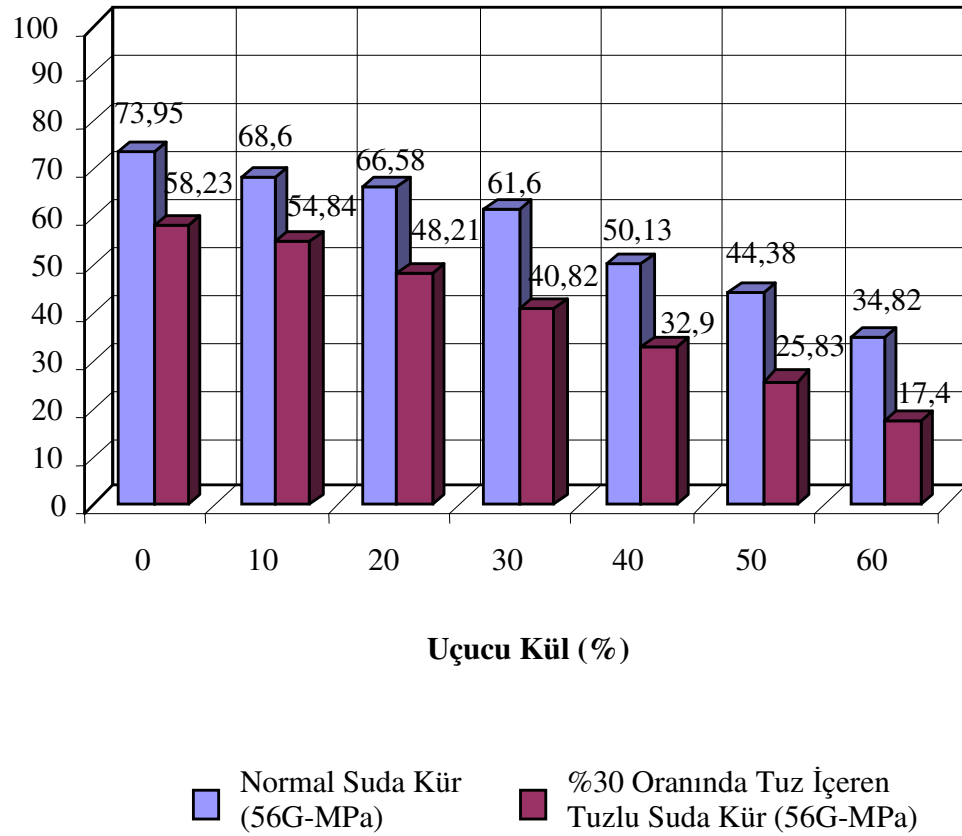
Eğilme dayanım deneyi sonucu iki parçaya ayrılan harç numuneleri basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Çizelge 5.7.'den de görüldüğü gibi %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür sonucu numunelerin basınç dayanımları da normal suda kür edilen numunelere oranla azalmıştır.

Çizelge 5.7. Normal suda ve %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür sonucu numunelerin basınç dayanımları (MPa)

Karışımın Adı	Uçucu Kül (%)	Çimento (%)	Kum (gr)	Su (gr)	Normal Suda Basınç Dayanımı (56G-MPa)	Tuzlu Suda Basınç Dayanımı (56G-MPa)
NH2	0	100	1350	225	73.95	58.23
UKH2 10	10	90	1350	225	68.60	54.84
UKH2 20	20	80	1350	225	66.58	48.21
UKH2 30	30	70	1350	225	61.60	40.82
UKH2 40	40	60	1350	225	50.13	32.90
UKH2 50	50	50	1350	225	44.38	25.83
UKH2 60	60	40	1350	225	34.82	17.40

Eğilme dayanım deneyi sonucu iki parçaya ayrılan prizmatik harç numuneleri incelenmiş ve %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür sonucu harç numunelerinin daha fazla su emdiği gözlenmiştir. Bu durum %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür sonucu numunelerin su geçirgenliğinin arttığını göstermektedir. Normal suda ve %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür sonucu numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim Şekil 5.7.'de grafik çizim olarak verilmiştir.

Basınç Dayanımı (MPa)



Şekil 5.7. Normal suda ve %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür sonucu harç numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

5.5. Normal Suda Kür Edilen Harç Numunelerinin Donma - Çözülme Deneyi

Donma-çözülme olayı, fiziksel bir etkidir. Islanarak doygun duruma gelen ve donma-çözülme devirlerine maruz kalan bütün beton ve harç numuneleri kısa sürede hasar görmektedirler. Tekrar tekrar yer alan donma-çözülme olayları karşısında, numunedeki iç gerilmeler nedeni ile harç numunesi içinde çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar giderek daha büyük hale gelmektedirler. Düşük sıcaklıklarda, numunenin içerisindeki su yavaş yavaş donmaya başlamaktadır; yani, donma olayı aniden yer almamaktadır. Numune içindeki kapiler boşluklar tamamen ya da %91'den daha çok suyla dolu durumda olduklarında, donmanın başlaması ve suyun bir miktarının buz haline dönüşmesi ile ortaya çıkan hacim genleşmesi, boşluklardaki henüz donmamış durumdaki su üzerinde hidrolik basınç yaratmaktadır; henüz donmamış durumdaki su, boşluklardan dışarıya itilmektedir. Boşluklardan dışarıya çıkmaya zorlanan su, boşlukların etrafındaki çimento hamurunun çatlamasına yol açacak büyüklükte gerilmeler yaratmaktadır. Numunedeki sıcaklığın artması ile harç numunesi soğukken oluşmuş olan buzlar çözülmekte, böylece, numunenin içerisindeki gerilme ortadan kalkmış olmaktadır. Ancak, bir başka zamanda yer alan soğuma karşısında aynı olaylar tekrar etmektedir (Erdoğan, 2003).

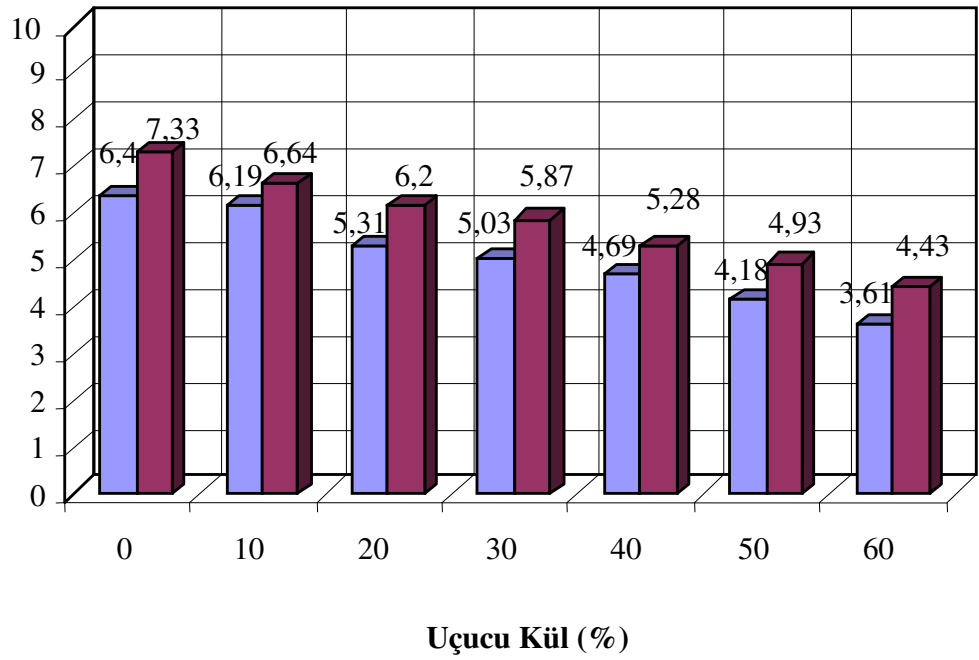
Yapılan çalışmada, harç numuneleri normal suda 56 günlük kür işleminden sonra donma-çözülme etkisinde bırakılmıştır. Numuneler 4 saat boyunca -20°C sıcaklıkta dondurucu içerisinde donma, daha sonra yine 4 saat boyunca $+20^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta su içinde çözülme olmak üzere, toplam bir çevrim süresi 8 saat olarak belirlenen donma-çözülme çevrimi bütün numunelere 1 hafta sürekli uygulanmıştır. Ancak gece 8 saat dondurucu içerisinde dondurucu çalışmadan bekletilmiştir. Donma-çözülme çevrimleri tamamlanan harç numuneleri üzerinde eğilme ve basınç dayanım deneyleri uygulanmıştır. Donma-çözülme etkisinde bırakılan harç numuneleri ile bu etkiye maruz kalmayan numunelerin eğilme dayanım sonuçları Çizelge 5.8.'de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Donma-çözülme deneyi sonucu harç numunelerinin eğilme dayanımları

Karışımın Adı	Uçucu Kül (%)	Çimento (%)	Kum (gr)	Su (gr)
NH	0	100	1350	225
UKH 10	10	90	1350	225
UKH 20	20	80	1350	225
UKH 30	30	70	1350	225
UKH 40	40	60	1350	225
UKH 50	50	50	1350	225
UKH 60	60	40	1350	225

56 gün süre ile normal suda kür edilen şahit numunenin eğilme dayanımı 7.33 MPa iken, numune donma-çözülme olayına maruz kaldıktan sonra eğilme dayanımı %14.53 oranında azalmış ve 6.4 MPa olmuştur. Harç karışımında kullanılan uçucu kül oranı %60 seviyesine geldiğinde, normal suda kür edilen numunenin eğilme dayanımı 4.43 MPa iken, donma-çözülme olayına maruz kalan harç numunesinin eğilme dayanımı %22.71 oranında düşmüş ve 3.61 MPa olmuştur. Harç karışımında kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, donma-çözülme olayına maruz kalan numunelerde ve normal suda kür edilen numunelerde eğilme dayanım değerlerinin gittikçe azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, harç numunelerinde uçucu kül miktarının artması sonucu eğilme dayanım değerinin düştüğü gibi donma-çözülme olayına maruz kalan numunelerin de eğilme dayanımlarının normal suda kür edilen numunelere göre daha az olduğunu göstermektedir. Şekil 5.8.'de donma-çözülme etkisinde bırakılan harç numuneleri ile bu etkiye maruz kalmayan harç numunelerinin eğilme dayanım sonuçları grafik olarak verilmiştir.

Eğilme Dayanımı (MPa)



■ Donma – Çözülme Sonrası Eğilme Dayanımı (56G-MPa)
 ■ Normal Eğilme Dayanımı (56G-MPa)

Şekil 5.8. Donma – çözülme deneyi sonucu harç numunelerinin eğilme dayanımları

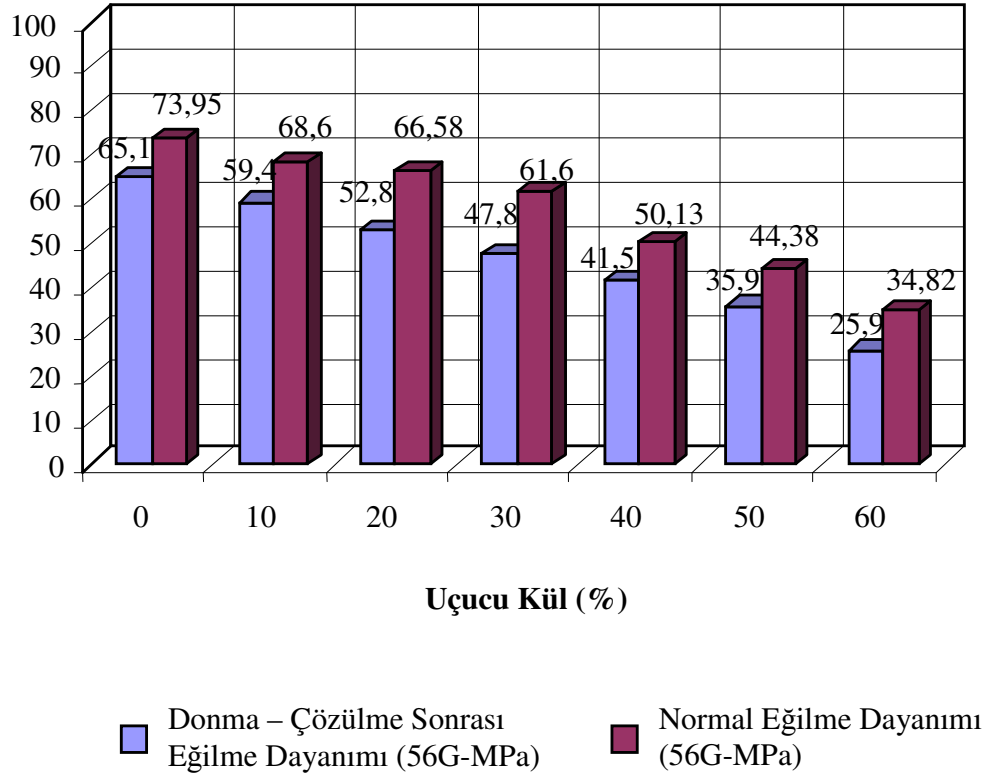
Çizelge 5.9.'da ise harç numunelerinin donma-çözülme deneyi sonucu elde edilen basınç dayanımları ile donma-çözülme etkisinde bırakılmayan harç numunelerinin basınç dayanım sonuçları verilmiş ve donma-çözülme deneyi sonucu numunelerin basınç dayanımlarının da azaldığı gözlenmiştir.

Çizelge 5.9. Donma-çözülme deneyi sonucu harç numunelerinin basınç dayanımları

Karışımın Adı	Uçucu Kül (%)	Çimento (%)	Kum (gr)	Su (gr)
NH	0	100	1350	225
UKH 10	10	90	1350	225
UKH 20	20	80	1350	225
UKH 30	30	70	1350	225
UKH 40	40	60	1350	225
UKH 50	50	50	1350	225
UKH 60	60	40	1350	225

Yapılan deneye göre, 56 gün süre ile normal suda kür edilen şahit numunenin basınç dayanımı 73.95 MPa iken, 56 günlük donma-çözülme olayına maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı %13.59 oranında azalma göstermiş ve 65.1 MPa olmuştur. Harç karışımında kullanılan uçucu kül oranı %40 seviyesine (UKH 40) geldiğinde ise normal suda kür edilen numunenin basınç dayanımı 34.82 MPa iken, numune donma-çözülme olayına maruz kaldığında basınç dayanımı %20.79 oranında azalmış ve 25.9 MPa'a düşmüştür. Elde edilen basınç dayanım sonuçları Şekil 5.9.'da grafik çizim olarak verilmiştir.

Basınç Dayanımı (MPa)



Şekil 5.9. Donma-çözülme deneyi sonucu harç numunelerinin basınç dayanımları

Çizelge ve şekilden de anlaşılacağı gibi harç karışımlarında kullanılan uçucu kül oranı arttıkça, hem donma-çözülme olayına maruz kalan numunelerin hem de normal suda kür edilen numunelerin basınç dayanım değerlerinde azalma gözlenmiştir. Numunelerin donma-çözülme olayına maruz kalmaları da basınç dayanım değerinin düşmesine neden olmaktadır.

6. SONUÇLAR

1. Hazırlanan çalışmada elde edilen sonuçlara göre; ilk olarak yapılan deneyde 7 ve 28 günlük harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları incelenmiştir. Karışımdaki çimento oranı %90 ve uçucu kül oranı %10 iken karışımın 7 günlük eğilme dayanımı 4.91 MPa ve 28 günlük eğilme dayanımı 6.60 MPa'dır. Karışımında kullanılan çimento oranının azaltılıp, uçucu kül oranının arttırılması sonucu harç numunelerinin ilk günlerdeki eğilme ve basınç dayanımlarının giderek azaldığı ve karışımdaki çimento oranı %60, uçucu kül oranı %40 seviyesine geldiğinde karışımın 7 günlük eğilme dayanımının 3.51 MPa, 28 günlük eğilme dayanımının ise 4.17 MPa'a düştüğü gözlenmiştir. Harç karışımında kullanılan çimento oranı %60 ve uçucu kül oranı %40 seviyesine geldiğinde karışıma hacimce sabit %5 oranında kireç katılmıştır. Karışımında kireç kullanılması ile karışımın bağlayıcılığını kaybetmemesi ve uçucu kül-kireç puzolanik reaksiyonu sonucu ilerleyen yaşlarda da numune basınç dayanımında artış amaçlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan karışımlarda da ilk günlerdeki eğilme ve basınç dayanımları düşük, ancak, ilerleyen yaşlardaki dayanımları daha yüksek çıkmıştır.

Uçucu küllerin ekonomik olarak değerlendirilebilmesi kullanılabilir miktara, gerekli nakliye miktarına ve istenilen tasarıma bağlıdır. Hazırlanan çalışmada 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlu kalıplarla küçük harç numuneleri elde edilmiştir. 1 m³ şahit numunedeki çimento maliyeti 125.76 YTL iken %40 oranında uçucu kül içeren harç numunesindeki çimento+uçucu kül maliyeti 75.456 YTL'dir. Bu basit analiz bile belirli miktarda uçucu kül kullanılan numunelerin çok daha ekonomik olarak elde edileceğini göstermektedir. Yapılan çalışmaya göre, harç numunesinde kullanılacak uçucu kül miktarı en fazla %40 seviyesinde olmalıdır. Kullanılan uçucu kül miktarı %40 oranından fazla olduğunda numune dayanımı büyük oranda düşmektedir.

2. Farklı oranlarda uçucu kül ve çimento kullanılarak üretilen ve normal su ile %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür edilen harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanım sonuçları karşılaştırılmıştır. Numunelerin %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür edilmeleri sonucu harç numunelerinin normal suda kür edilen numunelere göre daha fazla miktarda su emdiği belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak, %30 oranında tuz içeren tuzlu suda kür sonucu numunelerde boşluk miktarının arttığı anlaşılmıştır. Bu durum, tuzlu suda kür edilen harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımlarının azalmasına neden olmuştur. Ancak normal suda kür edilen harç numunelerinin 56 günlük dayanım sonuçları 7 ve 28 günlük dayanımlarına oranla artmıştır. Örneğin UKH 40 numunesinin 7 günlük basınç dayanımı 18.21 MPa ve 28 günlük basınç dayanımı 23.30 MPa iken 56 günlük basınç dayanımı 50.13 MPa'a ulaşmıştır. Bu durum, ilerleyen yaşlarda uçucu kül içeren numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının arttığını kanıtlamıştır.

3. Harç numunesi donma olayına maruz kaldığında numune içindeki kapiler boşluklar tamamen ya da %91'den daha çok suyla dolu durumda olduklarında, donmanın başlaması ve suyun bir miktarının buz haline dönüşmesi ile ortaya çıkan hacim genleşmesi, boşluklardaki henüz donmamış durumdaki su üzerinde hidrolik basınç yaratmaktadır; henüz donmamış durumdaki su, boşluklardan dışarıya itilmektedir. Boşluklardan dışarıya çıkmaya zorlanan su, boşlukların etrafındaki çimento hamurunun çatlamasına yol açacak büyüklükte gerilmeler yaratmaktadır. Numune çözülme etkisine bırakıldığında ise numunedeki sıcaklığın artması ile harç numunesi soğukken oluşmuş olan buzlar çözülme, böylece, numunenin içerisindeki gerilme ortadan kalkmış olmaktadır. Tekrarlanan bu olaylar sonucunda, donma-çözülme etkisine maruz bırakılan harç numuneleri eğilme ve basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Örneğin %90 oranında çimento ve %10 oranında uçucu kül içeren karışımın 56 günlük eğilme ve basınç dayanımı sırası ile 6.19 MPa ve 6.64 MPa iken; eğilme dayanımı %41.68 ve basınç dayanımı %33.28 oranında azalarak, karışımdaki çimento oranı %40 ve uçucu kül oranı %60

seviyesine geldiğinde harç numunesinin eğilme ve basınç dayanımı sırası ile 3.61 MPa ve 4.43 MPa'a düştüğü gözlenmiştir.

4. Harç karışımlarında kullanılan uçucu kül oranı arttıkça kalıp alma ve priz süreleri de artmıştır. Bu durum, soğuk havalarda kalıp alma süresi daha uzun süreceği için sorun olabilmektedir.

5. Karışımındaki uçucu kül miktarının artıp, çimento miktarının azalması sonucu karışımın yoğunluğu azalmıştır. Bu durum harç numunelerinin birim ağırlıklarının giderek azalmasına neden olmuştur. Örneğin %90 oranında çimento ve %10 oranında uçucu kül içeren harç numunesinin birim ağırlığı 2.18 gr/cm^3 iken; çimento oranı %10 ve uçucu kül oranı %90 seviyesine geldiğinde harç numunesinin birim ağırlığının azalma gösterip 1.93 gr/cm^3 olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ağar, E., Sütaş, İ., Öztaş, G., 1998, Beton Yollar, İTÜ İnşaat Fak.
- Akakın, T., 2006, Betonda Çekme Dayanımı, Türkiye Hazır Beton Birliği, Sayı 1, 40-44.
- Aruntaş, H. Y., 2006, Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 21, No 1, 203 s.
- Atış, C. D., 2000, Uçucu Kül İçeren Silindire Sıkıştırılabilen Betonların Özellikleri, Turk J. Engin Environ Sci, Tubitak, Cilt 25, 503-515.
- Çelik, K., Kılınçkale, F. M., 2005, Katkı Miktarı, Türünün ve Öğütmenin Çimentonun Dayanım Performansına Etkileri, II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, İstanbul, 370-380.
- Erdoğan, T.Y., 2003, Beton, Semih Ofset Matbaacılık Yayıncılık ve Ambalaj San. Tic. A.Ş 695 s.
- Erdoğan, T.Y., 1993, Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı-Uçucu Kül ve Dayanım Performansına Etkileri, II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, İstanbul, 370-380.
- Erdoğan, T.Y., 1993, Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı-Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Ankara, 1-8.
- Özkul, H., Taşdemir, M. A., Tokyay, M., Uyan, M., 1999, Her Yönüyle BETON, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Postacıoğlu, B., 1987, Beton, Teknik Kitaplar Yayınevi, Cilt 2, İstanbul.
- Şengül, Ö., Taşdemir, M. A. ve Sömez, R., Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimsizliği.
- Taşdemir, M. A., 2004, Uçucu Kül Nedir?, ACE 2002 Sempozyumu, İTÜ İnşaat Fakültesi. Tokyay, M., Erdoğan, K., 1998, Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara.

- Türk, K., Karataş, M., ve Ulucan, Z. Ç., 2006, Farklı Oranlarda C Sınıfı Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Sıkışan Betonun Dayanım Özellikleri, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, Cilt 18, Sayı 4, 513–520.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2003, Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, Ankara.
- TS EN 197–1, 2002, Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, 14 s.
- TS EN 450, Uçucu Kül-Betonda kullanılan-Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, TSE, Ankara, 1998.
- TS EN 451–1, Uçucu Kül-Deney Metotları-Bölüm 1: Serbest Kalsiyum Oksit Tayini, TSE, Ankara, 2000.
- TS EN 451–2, Uçucu Kül-Deney Metodu-Bölüm 2: Islak Eleme ile İncelik Tayini, TSE, Ankara, 2000.
- TS 639, Uçucu Küller, TSE, Ankara, 1975.
- TS 640, Çimento-Uçucu Küllü Çimento, TSE, Ankara, 1992.
- Ün, H., 2005, Değişik Tip Çimentolarla Hazırlanan Harçların Eğilme Sonrası Basınç Dayanımı ile Doğrudan Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması, DEÜ Müh. Fak., Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 7, Sayı 1, 97–109.
- Montemor, M.F., Simoes, A.M.P., Salta, M.M., 2000, Effect of Fly Ash on Concrete Reinforcement Corrosion Studied by EIS, Cement&Concrete Composites, Cilt 22, No 3, 175–185.
- Ünal, O. Ve Uygunoğlu, T., 2004, Soma Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi, Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak.
- Yazıcı, H., 2005, Yapay Alçı-Uçucu Kül Esaslı Bağlayıcıların Mekanik Özellikleri, DEÜ Müh. Fak., Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 7, Sayı 1, 65-72.