

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAŞIYICI HAFİF BETONUN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Türker DİKİCİ

Eylül, 2010

İZMİR

TAŞIYICI HAFİF BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı**

Türker DİKİCİ

**Eylül, 2010
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

TÜRKER DİKİCİ, tarafından **DOÇ. DR. SELÇUK TÜRKEL** yönetiminde hazırlanan “**TAŞIYICI HAFİF BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Doç. Dr. Selçuk TÜRKEL

Yönetici

.....
Prof. Dr. Bülent BARADAN

Jüri Üyesi

.....
Yrd. Doç. Dr. Şemsi YAZICI

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince güler yüzü ile beni karşılayıp, bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren danışman hocam Sn. Doç. Dr. Selçuk TÜRKEK'e, derslerimde ve çalışmalarımındaki yardımlarından dolayı Yapı Malzemesi Ana Bilim Dalındaki tüm hocalarıma, araştırma görevlilerine ve laboratuvar çalışanlarına; beton numunelerin dökümünde bana yardımcı olan değerli arkadaşım İnş. Müh. Gökhan Turan'a ve son olarak İnş. Yük. Müh. Ebru Tarım'a teşekkür ederim.

Malzeme temini konusunda bilim yolunda mücadele verenlere yardımını esirgemeyen Pomza Export A.Ş. firmasına, Çimentaş İzmir Çimento Fabrikası Türk A.Ş firmasına ve Akçansa Çimento San.T.A.Ş firmasına çok teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca bana maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen annem, babam, abilerim ve ikiz kardeşime şükranlarımı sunarım.

Türker DİKİCİ

TAŞIYICI HAFİF BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Bu çalışma kapsamında pomza agregası ve değişik oranlarda mineral katkı kullanılarak üç ayrı tip taşıyıcı hafif beton üretilmiştir. Üretilen taşıyıcı hafif betonlar, değişik yaş (7, 28 ve 56) ve değişik kür koşullarında (su kürü ve buhar kürü) kuru yüzey doymuş ve etüv kurusu halinde mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Mekanik deneyler olarak basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü ve gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi araştırılmıştır. Kuru yüzey doymuş haldeki numunelerin birim hacim ağırlık değerleri bütün numune tiplerinde 2000 kg/m^3 ün altında kalmıştır. Etüv kurusu numunelerde ise BHA oldukça düşerek $1500-1600 \text{ kg/m}^3$ civarında değer almıştır. Etüv kurusu durumunda kırılan numunelerin basınç dayanımı sonuçları, kuru yüzey doymuş hale göre yüksek çıkarken, eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımında tam tersi sonuç görülmüştür. Buhar kürü ile bir günde elde edilen sonuçlar, kuru yüzey doymuş halde yedi günde elde edilen sonuçlar ile paralellik göstermiştir. Diğer taraftan kuru yüzey doymuş haldeki elastisite modülü sonuçları ise etüv kurusu durumundan yüksek değer vermiştir.

Anahtar sözcükler : Taşıyıcı hafif beton, kuru yüzey doymuş-etüv kurusu halleri, mekanik özellikler.

AN INVESTIGATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE

ABSTRACT

The three types of structural lightweight concrete incorporating pumice aggregate and mineral additives were produced within the scope of thesis. The concretes were subjected to mechanical test under the different ages (7, 28 and 56) and different curing conditions (water curing and steam curing) in the form of saturated surface dry and oven dry. Compressive strength, flexural tensile strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and stress-strain relationship were determined for three types of lightweight concrete. In all samples, the unit weight values of saturated surface dry samples were below 2000 kg/m^3 . For oven dry samples, unit weight values extremely decreased about 1500 to 1600 kg/m^3 . The results of compressive strength of oven-dry condition- samples yielded higher values than those saturated surface dry condition. On the other hand, the opposite result was observed while experiments of flexural tensile strength and splitting tensile strength. The results obtained by steam curing in a day showed similar values with the 7-day results of saturated surface dry condition. The results of modulus of elasticity in saturated surface dry condition yielded higher values than those in oven dry condition.

Keywords : Structural lightweight concrete, saturated surface dry - oven dry conditions, mechanical properties.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – HAFİF BETONUN ÖZELLİKLERİ.....	4
2.1 Hafif Betonun Tanımı	4
2.2 Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Hafif Agregalar	4
2.2.1 Pomza Agregası	5
2.2.1.1 Pomzanın Kullanım Alanları	8
2.2.1.1.1 İnşaat Sektörü.....	8
2.2.1.2 Pomza Rezervi ve Üretimi	9
2.3 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları.....	10
2.4 Hafif Betonunların Sınıflandırılması.....	11
2.5 Hafif Betonunların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	12
2.5.1 İşlenebilirlik	12
2.5.2 Su Emmesi	13
2.5.3 Birim Hacim Ağırlık	14
2.5.4 Dayanım	15
2.5.5 Elastisite Modülü	17
2.5.6 Gerilme-Şekil Değiştirme ($\sigma - \epsilon$) Eğrisi ve Özellikleri	19
2.5.7 Agrega- Matris Aderansı.....	20

BÖLÜM ÜÇ – PUZOLANİK MALZEMELER 22

3.1 Puzolanların Tanımı ve Genel Sınıfları.....	22
3.1.1 Puzolanik Reaksiyon.....	22
3.1.2 Puzolanik Aktiflik.....	22
3.2 Uçucu Kül.....	23
3.2.1 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	24
3.2.2 Uçucu Küllerin İnşaat Alanında Kullanımı.....	26
3.2.3 Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkisi.....	27
3.2.3.1 İşlenebilirlik.....	28
3.2.3.2 Su ihtiyacı.....	28
3.2.3.3 Priz süresi.....	28
3.2.3.4 Hidratasyon ısısı.....	29
3.2.3.5 Basınç ve Çekme Dayanımı.....	29
3.2.3.6 Dayanıklılık.....	30
3.3 Silis Dumanı.....	31
3.3.1 Silis Dumanının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	32
3.3.2 Silis Dumanının Betonun Özelliklerine Etkisi.....	33
3.3.2.1 İşlenebilirlik.....	34
3.3.2.2 Su İhtiyacı.....	34
3.3.2.3 Priz süresi.....	35
3.3.2.4 Hidratasyon ısısı.....	35
3.3.2.5 Basınç ve Çekme Dayanımı.....	35
3.3.2.6 Dayanıklılık.....	37
3.4 Yüksek Fırın Cürufu.....	37
3.4.1 Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	38
3.4.2 Yüksek Fırın Cürufunun Beton Özelliklerine Etkileri.....	40
3.4.2.1 İşlenebilirlik ve Su İhtiyacı.....	41
3.4.2.2 Terleme.....	41
3.4.2.3 Hidratasyon Isısı.....	41
3.4.2.4 Priz Süresi.....	42

3.4.2.5 Basınç Dayanımı	42
3.4.2.6 Çekme Dayanımı	42
3.4.2.7 Elastisite Modülü.....	43
3.4.2.8 Dayanıklılık	43
BÖLÜM DÖRT – KAYNAK ÖZETLERİ	45
BÖLÜM BEŞ – DENEYSEL ÇALIŞMA.....	50
5.1 Amaç	50
5.2 Kapsam.....	50
5.3 Kullanılan Malzemeler	51
5.3.1 Pomza Agregası.....	51
5.3.2 Çimento	55
5.3.3 Mineral Katkılar	55
5.3.4 Kimyasal Katkı.....	57
5.3.5 Karma Suyu	57
5.4 Karışımların Hazırlanması	58
5.4.1 Puzolanik Aktivite Karışımı	58
5.4.2 Hafif Beton Karışımı	59
5.5 Taze ve Sertleşmiş Beton Deneyleri	60
5.5.1 Taze Beton.....	60
5.5.2 Taze Beton Deneyleri.....	61
5.5.2.1 Çökme (Slump) Deneyi.....	61
5.5.2.2 Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Deneyi.....	62
5.5.3 Sertleşmiş Beton Deneyleri	62
5.5.3.1 Basınç Dayanımı Tayini	62
5.5.3.2 Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini	63
5.5.3.3 Yarmada Çekme Dayanımı Tayini.....	65
5.5.3.4 Elastisite Modülü Tayini	66
5.5.3.5 Buhar Kürü Uygulaması.....	67

BÖLÜM ALTI – DENEY SONUÇLARI..... 68

6.1 Taze Beton Deney Sonuçları	68
6.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	69
6.2.1 Puzolanik Aktivite Deney Sonuçları	69
6.2.2 Buhar Kürü Uygulaması Sonuçları	71
6.2.3 KYD ve Etüv Kuru Numunelerin basınç Dayanımı Sonuçları.....	73
6.2.3.1 Basınç Dayanımı Sonucu (KYD)	73
6.2.3.2 Basınç Dayanımı Sonucu (ETÜV Kuru)	75
6.2.4 Numune Yaşının Basınç Dayanımına Etkisi	77
6.2.5 Birim Hacim Ağırlık-Basınç Dayanımı İlişkisi.....	81
6.2.6 Silindir Basınç Dayanımı ve Küp Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki ...	82
6.2.7 Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları	83
6.2.8 Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları	85
6.2.9 Silindir Basınç Dayanımı ile Yarmada Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki	87
6.2.10 Eğilme Dayanımı ve Küp Basınç Dayanımı Arasındaki ilişki	88
6.2.11 Eğilmede Çekme ve Yarmada Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki	90
6.2.12 Gerilme-Birim Deformasyon İlişkisi.....	91
6.2.13 Elastisite Modülü Sonuçları	94

BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR VE ÖNERİLER 99

7.1 Karışım Seçimi İle İlgili Yapılan Deney Sonuçları	99
7.2 Taze Beton Deney Sonuçları	99
7.3 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	100

KAYNAKLAR 104

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Hafif betonun (LWAC) kullanımının mazisi milattan önce 3000'de Hint Vadisi medeniyeti döneminde Mohenjo-Daro ve Harappa gibi ünlü yerleşim yerlerinin inşa edilmesine kadar gider. Avrupa'da bundan yaklaşık 2000 yıl evvel hafif beton ilk olarak Romalıların, Romadaki Pantheon tapınağı ve Kolezyumu inşa etmesinde kullanılmıştır. Almanya, İtalya, İzlanda ve Japonya gibi ülkelerde yapısal taşıyıcı betonda halen agrega olarak pomzanın kullanılmakta olduğunu da belirtmek gerekir. Malezya gibi bazı yerlerde taşıyıcı hafif beton üretmek için palmiye yağından oluşan dış kabuk kullanılmaktadır. Bilinen ilk taşıyıcı hafif betonlar doğal kaynaklardan elde edilmekteydi ve bunların birçoğu da pomza, cüruf ve tuf gibi volkaniklerdi. Bunlar hem ince hem de iri agrega olarak kullanılmaktaydılar. Bu malzemeler ince agrega olarak kullanıldıklarında aktif pulozanik madde olarak işlev görürler. Hidrasyon esnasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girer ve kalsiyum silikat hidrat üretirler. Kalsiyum silikat hidrat dayanıklılık özelliklerini artırarak yapıyı güçlendirir ve gözenek yapısını değiştirir (Chandra ve Bertsson, 2002).

Geleneksel betonların taşıyıcı özelliklerinin yüksek olmasına karşılık, birim kütlelerinin fazla oluşu, yüksek yapıların inşasında düşey taşıyıcı elemanların boyutlarını çok büyüttüğünden problem olmaktadır. Diğer taraftan bu tür yapılarda temel maliyeti artmakta, pratik hayata geçirilmesi gerekli normale göre büyük açıklıklarda, bazen bu betonla yapılan eğilme elemanları kendi öz kütlelerini taşıyamaz hale gelmektedir. Deprem yükleri de kütle ile doğru orantılı olduğundan geleneksel betonarme yapılara gelen deprem yükleri de büyük değerler almaktadır (Hüsem, 1995).

Dünyada hafif beton üretimi, içinde bulunduğumuz yüzyılın ilk yıllarında başlamıştır. Önceleri genellikle duvar elemanlarında kullanılan bu üretim, İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra taşıyıcı hafif beton üretimini de kapsamıştır. Özellikle temel problemlerinin yaşandığı yerlerde taşıyıcı hafif betonların ekonomik çözümler getirdiği saptandıktan sonra, başta ABD olmak üzere birçok ülkedeki yapılarda hafif

beton kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise inşaat sektöründe, hafif beton kullanımında giderek bir artış görülmektedir (Tokyay ve Şatana, 1997).

Bir özel beton türü olan taşıyıcı hafif beton, özellikle son yıllarda yapısal amaçlar için kullanılmaktadır. Günümüzde taşıyıcı hafif betonlar özellikle bir yapının ölü yükünün ve kullanılacak betonarme yapı elemanlarının ağırlıklarının azaltılmasında kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte özellikle yüksek yapıların kullanım alanlarının ve açıklıklarının arttırılmasında etkin rol oynar (Kok ve Min-Hong, 2002).

Normal beton inşaat mühendisliğinde yaygın uygulanma alanı bulan bir malzemedir. Böyle bir beton iyi bir taşıyıcı olmasına karşın birim ağırlığı büyük ve dolayısıyla ısı iletkenlik katsayısı yüksektir. Normal betonun birim ağırlığının düşürülmesiyle betonarme elemanın öz ağırlıkları azaltılarak yapı hafifletilebilir. Böylece taşıyıcı sistem elemanlarının kesitleri küçültülerek ekonomi sağlanabilir. Diğer yandan betonda birim ağırlığın azalmasıyla ısı iletkenlik katsayısı da küçülür (Konuk, Özyurt, Taşdemir, Yüceer , Sönmez, 2002).

Taşıyıcı hafif betonlar duvar panel ve blokların inşasında, çatı katı döşemelerinde, köprü açıklıklarında, ön yapımlı beton ünitelerinde çoğunlukla kullanılmaktadır. Bu amaçlarla taşıyıcı hafif beton üretmek özellikle deprem bölgelerinde yapılar inşa etmek için tercih sebebidir (Sarı ve Paşamehmetoğlu, 2005).

Hafif betonların; çimento hamurunun genleştirilmesi, beton bileşiminde sadece iri agrega kullanılması ya da geleneksel agrega yerine hafif agregalar kullanılması suretiyle de üretildikleri bilinmektedir. Taşıyıcı hafif betonların üretiminde özellikle hafif agrega kullanımı tercih edildiği de bir gerçektir. Kullanılan başlıca hafif agregalar; pomza, volkanik tüf, volkanik cüruf gibi doğal agregalar ya da genleştirilmiş kil, şist, perlit, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi yapay agregalardır (Durmuş, Arslaner, Hüsem ve Kolaylı, 1996).

Çalışmada, İzmir-Menderes yöresinden temin edilen pomza agregası ile taşıyıcı hafif beton üretimi hedeflenmiştir. Bu hedef kapsamında çimento yerine belli oranlarda silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikame edilerek değişik tipte beton numuneler elde edilmiş olup, bu betonlar değişik yaşlarda (7, 28 ve 56), kuru yüzey doymun ve etüv kurusu durumlarında basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda başta hedeflenen birim hacim ağırlığı 2000 kg/m^3 , ten küçük, basınç dayanımı 20 MPa' dan büyük taşıyıcı hafif betonlar üretilmiştir.

BÖLÜM İKİ

HAFİF BETONUN ÖZELLİKLERİ

2.1 Hafif Betonun Tanımı

ACI 213R-03' e göre taşıyıcı hafif betonlar, 28 günlük basınç mukavemeti 17 MPa'ı geçen ve hava kurusu birim hacim ağırlığı 1120-1960 kg/m³ arasında olan beton olarak tarif edilir.

TS EN 206-1' de hafif beton, etüv kurusu durumdaki birim hacim ağırlığı 800 kg/m³'ten büyük, 2000 kg/m³'ten küçük olan beton olarak tanımlanmaktadır. Hafif beton, yapımında kullanılan agreganın bir kısmı veya tamamı farklı tip ve özelliklere sahip hafif agregaların kullanılmasıyla da üretilebilir.

TS 2511 'e göre de, karakteristik basınç dayanımı 16 MPa'dan daha büyük olan ve havada kurumuş haldeki birim hacim ağırlığı da en fazla 1900 kg/m³ olan hafif agregalı betonlar taşıyıcı hafif beton olarak sınıflandırılmaktadır.

2.2 Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Hafif Agregalar

Hafif beton üretiminde en çok başvurulan yöntem, hafif agrega kullanımı ile birim ağırlığı istenen düzeyde tutmaktır. Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregalar üretildikleri malzemenin kaynağına ve kendi birim ağırlıklarına göre sınıflandırılırlar. Üretildikleri malzemenin kaynağına göre hafif agregalar dört sınıfta toplanabilir (Ateş, 2000).

- **Doğal Hafif Agregalar** : Pomza taşı, volkanik tüf, volkanik cüruf,
- **Doğal Malzemenin Üretilen Yapay Hafif Agregalar** : Genleştirilmiş kil, genleştirilmiş şist, genleştirilmiş arduvaz, perlit, vermikülit gibi polimer esaslı malzemeler.
- **Endüstriyel Atıklardan Üretilen Hafif Agregalar** : Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül.

- **Endüstriyel Atıkların İşlenmesiyle Üretilen Hafif Agregalar :**
Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu ve kızdırılmış uçucu kül.

2.2.1 Pomza Agregası

Pomza madeni dünya endüstrisinde yeni olmamakla beraber, ülkemiz endüstrisine son yıllarda girmeye başlamış ve değeri yeni anlaşılan volkanik kökenli bir madendir. Pomza terimi İtalyanca bir sözcüktür. Değişik dillerde farklı sözcüklerle adlandırılmaktadır. Örneğin; Fransızca'da *Ponce*, İngilizce'de (iri taneli olanına) *Pumice*, (ince taneli olanına) *Pumicite*, Almanca'da (iri tanelisine) *Bims*, (ince tanelisine) *Bimstein* adı verilmektedir. Türkçe'de ise süngertaşı, köpük taşı, hışırtaşı, nasırtaşı, küvek, kisir gibi adlarda da anılmaktadır.

Pomza, boşluklu, süngerimsi, volkanik olaylar neticesinde oluşmuş, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklı, gözenekli camsı volkanik bir kayadır. Bir başka deyişle pomza, çok poroz olan volkanik taş camı olarak da tanımlanabilir. Oluşumu sırasında, bünyedeki gazların, ani olarak bünyeyi terk etmesi ve ani olarak soğuma nedeni ile, makro ölçekten mikro ölçeğe kadar sayısız gözenek içerir. Gözenekler arası genelde (özellikle mikro gözenekler) bağlantısız boşluklu olduğundan permeabilitesi düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir. Pomza, kendisine özgü bazı özellikleri ile benzer volkanik camsı kayalardan (perlit, obsidiyen, peks-tayn) ayrılır. Bunlardan rengi, gözenekliliği ve kristal suyunun olmaması ile pratik olarak ayrılmaktadır. En çok renk benzerliği/yakınlığı ve kimyasal bileşimi bakımından perlit ile karıştırılmakta olup, bazı durumlarda perlitten ayırt edilmesi zorlaşabilmektedir. Pomzada gözenekler, çoğunlukla birbiri ile bağlantılı değildir. İçerdiği gözenekler gözle görülebilecek boyutlardan, mikroskobik boyutlara kadar sayısız miktarda olup, her biri diğerinden camsı bir zarla yalıtılmıştır. Bu yüzden hafif, suda uzun süre yüzebilen, izolasyonu yüksek bir kayadır. Sertliği Mohs skalasına göre 5-6'dır. Kimyasal olarak %75'e varan silis içeriği bulunabilmektedir. Pomza madeninin genel olarak kimyasal bileşimi Tablo 2.1'de verilmiştir. (Çağlayan ve Kahrıman ,2003).

Tablo 2.1 Pomza madenin kimyasal bileşimi

Bileşik	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	Na₂O- K₂O	TiO₂ ve SO₃
Miktar (%)	60-75	13-17	1-3	1-2	7-8	Eser miktarıda

Kayacın içerdiği SiO₂ oranı, kayaca abrasif özellik kazandırmaktadır. Bu yüzden çeliği rahatlıkla aşındırabilecek bir kimyasal yapı sergileyebilmektedir. Al₂O₃ bileşimi ise ateşe ve ısıya yüksek dayanım özelliği kazandırır. Na₂O ve K₂O tekstil sanayiinde reaksiyon özellikleri veren mineraller olarak bilinmektedir.

Asidik ve bazik volkanik faaliyetler neticesinde iki tür pomza oluşmuştur. Bunlar; asidik pomza ve bazik pomzadır. Diğer bir deyişle, bazik pomzaya bazaltik pomza veya *Scoria* da denilmektedir. Bazaltik pomza , koyu renkli, kahverengimsi, siyahımsı olabilmektedir. Özgül ağırlığı 1-2 civarındadır. Yeryüzünde en yaygın olarak bulunan ve kullanılan tür olan asidik pomza, beyaz, kirli görünümünde ve grimsi beyaz renktedir. Her iki tür de, oluşum esnasında ani soğutma ve gazların bünyeyi ani olarak terk etmesi sonucu oldukça gözenekli bir yapı kazanmıştır. Ancak, asidik mağmanın yoğunluğu bazik mağmaya göre daha düşük olup, pomzanın özgül ağırlığı yaklaşık 0,5-1 civarındadır. Asidik ve bazik özellikler taşıyan pomzaların tipik kimyasal bileşimlerine birer örnek aşağıda Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2.2 Asidik ve bazik pomzaların kimyasal bileşimleri

Bileşim	Asidik pomza	Bazik Pomza
SiO ₂	70	45
Al ₂ O ₃	14	21
Fe ₂ O ₃	2,5	7
CaO	0,9	11
MgO	0,6	7
Na ₂ O+K ₂ O	9	8

Buradan da görüleceği üzere, asidik karakterli pomzalarda silis oranı daha yüksek olup, inşaat sektöründe yaygın kullanım alanı bulabilmektedir. Diğer taraftan, bazik karakterli pomzalarda da alüminyum, demir, kalsiyum ve magnezyum bileşenleri daha yüksek oranlarda bulunması nedeni ile, diğer endüstri alanlarında kullanım alanı bulabilmektedir.

Pomza yataklarında %5 - %15 arası yabancı madde olabilir. Pomzada gözenek hacimleri %85'e kadar çıkabilir. Bu bir pomza tanesinin %85'nin boşluk, %15'nin katı madde olabilmesi anlamına gelmektedir. Saf özgül ağırlık 2,2 civarındadır. Tane özgül ağırlığı ise tane büyüklüğüne ve yatağa göre değişir. Pomza tanesi büyüdükçe tane özgül ağırlığı azalır. Örneğin, aynı yatakta 0-2 mm' lik tane büyüklüğünde özgül ağırlık 0,75, 4-8 mm' lik grupta 0,65 ve 8-16 mm' lik grupta 0,45'tir. Tane ebatları arttıkça gözenek yüzdesi de artmaktadır. Pomzanın gözenek yüzdesi volkan bacasından uzaklaştıkça artar. Pomzanın gözenek yüzdesinin yükseldiği ve buna bağlı olarak düşük özgül ağırlığı, izolasyon amaçları için dökme malzemesi olarak kullanılmasını sağlamıştır. Ayrıca aynı özellikleri nedeni ile su hazırlama tesislerinde filtre malzemesi ve hafif duvar harcı için katkı maddesi olarak da kullanılmaktadır. Bu amaçlar için pomza yıkanır, yabancı taşlardan temizlenir, kurutulur ve tane büyüklüklerine göre sınıflandırılır. Yüksek gözeneklilik derecesi nedeni ile, pomza tanelerinin büyük dayanıklılıkları yoktur. Ancak bu dayanıklılık, taşıyıcı duvar yapımında kullanılan taş dayanıklılıklarına uygundur. Pomza çok iyi bir ısı izolatörüdür. Yığın gözenekliliği için betonun oldukça ince harçla yapılarak sadece pomza tanelerinin etrafını ince kaplanması sağlanır. (Gündüz ve diğer, 1998).

2.2.1.1 Pomzanın Kullanım Alanları

Pomza başlıca şu sektörlerde kullanılmaktadır:

- **İnşaat Sektörü**
- Kimya Sektörü
- Tarım Sektörü
- Tekstil Sektörü
- Diğer Endüstriyel ve Teknolojik Alanlar

2.2.1.1.1 İnşaat Sektörü. Pomza, inşaat alanında değişik kalemlerde kullanılan bir hammaddedir. Bu sektörde pomza, hafif beton elde edilmesinde agrega olarak kullanılmaktadır. Pomza, normal kumun ve çakılın 1/3 ile 2/3'si kadar ağırlığa eşit olup, aynı durum pomza ile yapılan betonlarda da görülebilmektedir. Pomzadan yapılan betonun normal betondan çok daha hafif olması nedeni ile taşınması, kullanılmasındaki kolaylıklar zaman ve işçilikten tasarruf sağlar. Zemin mekaniği açısından da temele inen yük azalacağından yaklaşık %17 oranında inşaat demirinden tasarruf sağlayabilmektedir. Pomzalı betonun ısı geçirgenlik katsayısı, normal betondan 4-6 kat daha fazla izolasyon sağlamakta olup, bu özelliğinden kaynaklanarak büyük çapta ısı ve enerji tasarrufu sağladığı/sağlayacağı bilinmektedir.

Pomza, her geçen gün yeni bir kullanım alanı bulan bir hammaddedir. Pumisit adı verilen ve bazen de, volkan külü, volkan tozu olarak da anılan ince taneli olanları çimentoda tras malzemesi (puzolan amaçlı) olarak da kullanılmaktadır. Pumis adı verilen iri taneli olanlar ise daha çok briket imalinde kullanılmaktadır.

Pomzanın hem dünyada hem de ülkemizde en çok kullanıldığı alan inşaat sanayiidir. Hafif beton bloklar, briketler ve diğer kullanım şekilleri inşaatta kullanılan harç ve inşaat demirinden tasarruf yapılmasını sağlamaktadır. Bunun yanında pomzanın gözenekli olması, pomzayla yapılan inşaatlardaki ısı ve ses izolasyonunu ideal hale getirebilmektedir. Ayrıca, yangına dayanıklılık açısından da normal betona kıyasla %20'ye varan oranda daha emniyetli olduğu kabul

edilmektedir. Bunun yanında hafif briket ve hazır duvarın nakliyesi de daha kolaydır. Pomzalı betonun normal betona kıyasla önemli bir üstünlüğü, daha elastik olması nedeni ile, depreme karşı dayanıklı olmasıdır. Ayrıca, donma olayından da etkilenmemektedir (Güngör ve Tombul, 1997).

2.2.1.2 Pomza Rezervi ve Üretimi

Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından yapılan araştırma sonuçlarına göre ülkemizde 2,8 milyar ton pomza rezervi bulunmaktadır. Bu toplam rezervin yaklaşık 1,5 milyar tonu Bitlis-Tatvan, yarım milyar tonu ise Nevşehir-Avanos-Ürgüp bölgelerindedir. Türkiye'deki asit karakterli pomzanın hemen bütünü Nevşehir, Kayseri, Ağrı, Van, Kars, Bitlis, Isparta, Burdur ve Muğla illeri sınırları içerisinde yer almaktadır. Bu bölgelerde açık işletme yöntemiyle çıkarılan pomzalar, yurt içi itibari ile, büyük oranda briket yapımında kullanılmaktadır. Ülkemizde en çok talep gören pomza, Nevşehir bölgesinin beyaz renkli pomzasıdır. Ayrıca, pomza özel boyalarda dolgu maddesi olarak kullanılır. Pürüzlü kaplamalarda ses izole edici duvar boyası olarak, motifli boya için astar macununu düzeltme işlerinde kullanılmaktadır. Dünya pomza rezervleri konusunda sağlıklı veriler bulunmamaktadır. Ama dünyanın en önemli pomza üreticileri (ortalama üretim miktarları) Tablo 2.3' de sırası ile verilmiştir (Founie, 2005).

Tablo 2.3 Dünya'nın en önemli pomza üretici ülkeleri ve üretim miktarları

Ülkeler	Üretim Miktarları (ton/yıl)
A.B.D	12.250.000
İtalya	4.600.000
Yunanistan	1.600.000
Türkiye	800.000
İspanya	600.000
Almanya	550.000
Guadalup	210.000
İran	150.000
Martinik	130.000

Görüldüğü gibi, Akdeniz Bölgesi dünyanın en önemli pomza üretim bölgesidir. İşletmeler açık ocak türündendir ve malzeme, genellikle kompakt olmadığı için

patlatma yapılmaksızın alınabilir. Üretici ülkelerin hemen hepsi, aynı zamanda önemli pomza ihracatçılarıdır. İthalatta ise Hollanda, İngiltere, Japonya, Singapur ve Kanada ilk beş ülkedir. Türkiye'den otuzdan fazla ülkeye pomza ihracatı yapılmaktadır. AB ülkeleri ve A.B.D. en önemli paya sahip alıcılardır (Önal ve diğer., 1999).

2.3 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları

Hafif betonun beton teknolojisine sunmuş olduğu bazı avantajlar ve dezavantajlar bulunmaktadır. Bunlardan bahsedecek olursak;

Hafif betonun avantajları

- Yapı ağırlığının azalmasına bağlı olarak düşey yüklerde azalmalar olur ve yapıya etkiyen atalet kuvvetleride azalır. Böylece deprem yapıya daha az etkir.
- Hafif betonla üretilen yapı elemanlarının birim ağırlıklarının düşük olması nedeniyle yapıdaki ölü yükler azalır. Böylece temelleri ve diğer yapı elemanlarını daha küçük boyutlarda tasarlamak ve inşa etmek mümkün olur.
- Eğilme etkisindeki elemanlarda donatı ekonomisi sağlar.
- Kalıp payandası gibi geçici taşıyıcılar ile mesnet ve temeller gibi daimi taşıyıcı elemanlarda ekonomi sağlar.
- Isı iletkenlik katsayılarının daha düşük olması nedeniyle ısı ve ses izolasyonu daha iyidir.
- Yangına karşı dayanıklıdır.
- Hafifliği nedeniyle taşınması ve yerleştirilmesi kolaydır.
- Homojen bir özellik gösterirler.

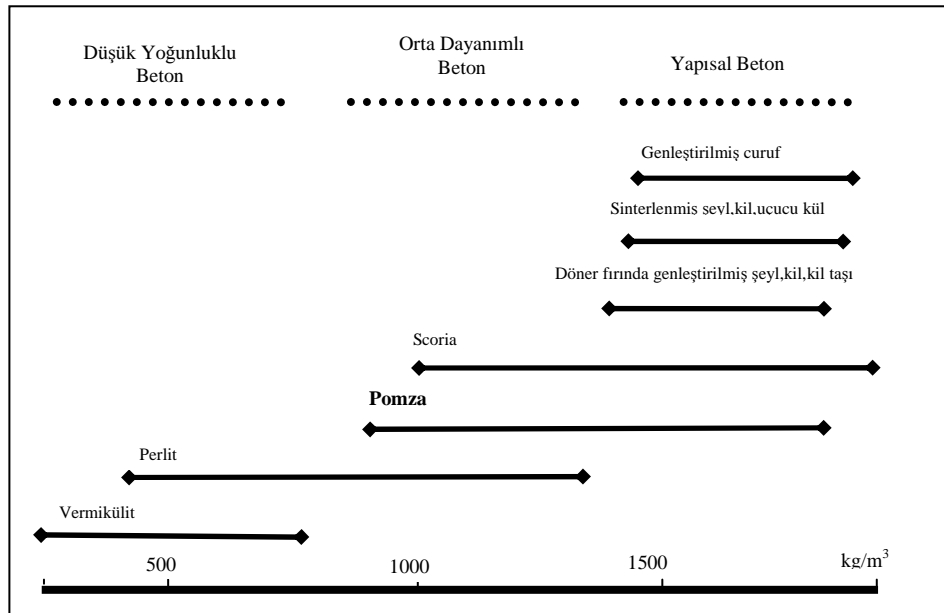
Hafif betonun dezavantajları

- Boşluklu olmaları nedeniyle basınç dayanımları düşük aşınmaya karşı dayanıksızdırlar.

- Elastisite modülünün düşük olmasından dolayı taşıyıcı hafif betonlu kirişlerde, sehimler ve dönmeler daha yüksek olur.
- Sünme ve rötre değerleri normal betondan daha yüksektir
- Geleneksel betona kıyasla daha çok çimento dozajı gerektirir. Buda maliyet artışına sebebiyet vermektedir.
- Normal betona göre daha düşük bir kesme-kayma dayanımına sahiptir.
- Hafif agrega bulmak zordur bunun için ek masraf gerekir.
- İmalat ve yerine konması daha nitelikli işçilik gerektirir. Buda daha çok emek ve maliyet demektir.

2.4 Hafif Betonların Sınıflandırılması

Kullanılan agregaya bağlı olarak betonun birim hacim ağırlığı ve mekanik özellikleri geniş bir aralıkta yer alır. ACI 213R-87' ye göre, hafif agregalı betonların sınıflandırılması Şekil 2.1' de görülmektedir.



Şekil 2.1 Yaklaşık birim hacim ağırlıklar ve hafif betonların sınıflandırılması

- Düşük yoğunluklu beton

Yapısal amaçlı kullanılmayan bu hafif betonlar yalıtım amaçlı kullanılır. Hava kurusu birim hacim ağırlıkları 800 kg/m^3 'ü aşar. Termal iletkenlik katsayıları düşüktür. Basınç dayanımları 0,7-7 MPa arasında değişir.

- Orta dayanımlı beton

Bu tür betonların basınç dayanımları yapısal olarak kabul edilebilecek seviyededir. Yalıtım performansı da iyi sayılabilecek düzeyde olan bu tür betonların basınç dayanımları 7-17 MPa arasında değişir.

- Yapısal hafif beton

Bu tür betonların üretildiği agregalar genel olarak genleştirilmiş kil, şeyl, cüruf, pomza gibi dayanımları nispeten daha yüksek olan agregalardır. ACI 213R-03, yapısal hafif betonları 28 günlük minimum basınç dayanımı 17 MPa, yoğunluğu $1120-1960 \text{ kg/m}^3$ arasında olan tamamıyla hafif agrega veya hafif agrega normal agrega kombinasyonu ile üretilen betonlar olarak tanımlanmaktadır.

2.5 Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

2.5.1 İşlenebilirlik

Hafif agregalı betonun reolojik davranışı normal betondan biraz farklıdır. Özellikle aynı çökme değerinde hafif agregalı beton daha iyi işlenebilirlik gösterir. Aynı şekilde, hafif agregalı betonun sıkıştırma faktörü, betonu sıkıştıran yerçekimi kuvveti yoğunluk düştükçe azaldığından, işlenebilirliği olduğundan daha düşük değer alır (Neville, 1995).

Yüksek çökme ve aşırı vibrasyon segregasyona neden olabilir. Hafif iri agrega taneleri yüzeye doğru çıkar. Hafif agregalı betonda aşırı vibrasyon normal agregalı betona kıyasla daha fazla segregasyona sebep olabilir. ACI 213R-03 iyi bir yüzey

elde etmek için çökme değerini 125 mm ile sınırlandırmıştır. Daha düşük çökme değeri yeterli işlenebilirlik ve koheziflik sağlayarak segregasyonu önler. Ayrıca, 125 mm'nin üzerinde çökme değerleri yüzeysel aşınmanın yanı sıra, perdahlama işleminin gereksiz yere gecikmesine neden olabilir (ACI 213R-03).

2.5.2 Su Emmesi

Betonun gözeneklerini işgal eden su, betonun mekanik ve termik özelliklerini olumsuz yönde etkilediğinden betonların az su emmesi istenir. Betonun su emmesi, hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregaların su emme kapasitesine ve agrega/çimento oranına bağlı olarak değişmektedir. Hafif agregalı betonların üretimlerinde kullanılan agregaların gözenekli yapılarından dolayı hafif betonların da su emmeleri oldukça yüksektir. Agregaların gözenek yapısı da hafif betonun su emme oranı üzerinde büyük rol oynamaktadır. Aynı agrega oranında fakat farklı agregalarla üretilen betonların su emme oranları da agregaların gözenek yapılarından dolayı farklı olmaktadır. Örneğin diatomit gibi çok yüksek gözenek oranına sahip agregayla üretilen betonların su emmeleri, pomza gibi yarı açık gözenekleri bulunan agregalarla üretilen hafif betonlarınkinden fazladır (Topçu ve Uygunoğlu, 2007).

Hafif ve normal betonlarda dayanıklılık açısından kılcal su emme oranı da oldukça önemlidir. Yüksek kılcal su emme miktarı direkt olarak harç, agregaçimento ara yüzeyindeki veya agregadaki kılcal boşluklar tarafından emilen su olup genel olarak betonun porozitesinden bağımsızdır. Direkt olarak kılcal boşluklarla ilgilidir (Uyan, 1975). Tablo 2.4' de bazı hafif agregaların su emme oranları ve fırın kurusu durumunda gevşek birim hacim ağırlıkları verilmiştir.

Tablo 2.4 Bazı hafif agregaların özellikleri (Chandra ve Berntsson, 2002)

Tip	Ağırlıkça Su Emme, %	Fırın kurusu Gevşek BHA, (kg/m ³)
Genleştirilmiş Kil	12-14	350-500
Genleştirilmiş Arduvaz	10-15	560-720
Genleştirilmiş Şist	12-14	500-800
Pomza	30-40	500-880
Genleştirilmiş Y F.C.	3-5	850-950

2.5.3 Birim Hacim Ağırlık

Hafif agregalı betonların yoğunluğu, betonların üretiminde kullanılan bileşenlere, özellikle de agreganın yoğunluğuna bağlıdır. Aynı malzemeden üretilmiş olsalar bile, değişik üretim teknikleri kullanılarak betonların dayanım ve yoğunlukları değiştirilebilir (Uygunoğlu, 2008). Hafif betonun yoğunluğu, çimentonun dozajına, agregaların tane dağılımına, agregaların nem içeriğine, karışım oranına, su-bağlayıcı oranına, kimyasal ve mineral katkı maddelerine bağlıdır. Bunun dışında betonun yerleştirme ve sıkıştırma yöntemine ve kür koşullarına da bağlıdır.

TS EN 206-1 'e göre hafif betonların yoğunluğu D 1,0 ile D 2,0 arasında sınıflandırılmaktadır. Yoğunluk sınıfına bağlı olarak yoğunluk aralığında 800 kg/m^3 'ten az ve 2000 kg/m^3 'ten fazla olmaması gerekmektedir. Tablo 2.5' de TS EN 206-1 'e göre hafif betonun yoğunluğa göre sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 2.5 Hafif betonun BHA sınıflandırılması

Yoğunluk sınıfı	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Yoğunluk aralığı (kg/m^3)	≥ 800 ve ≥ 1000	≥ 1000 ve ≥ 1200	≥ 1200 ve ≥ 1400	≥ 1400 ve ≥ 1600	≥ 1600 ve ≥ 1800	≥ 1800 ve ≥ 2000

2.5.4 Dayanım

Aynı beton dayanımı için hafif agregalı karışımda çimento dozajı normal betona göre daha yüksektir. Yüksek dayanım seviyelerinde ilave çimento dozajı % 50 yi aşabilir. Daha yüksek çimento içeriği, daha düşük su/çimento oranı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla matrisin dayanımı daha yüksektir. Bununla birlikte, agrega dayanımı ile bu agregadan yapılmış betonun dayanımı arasında genel bir ilişki bulunmamaktadır (Neville, 1995).

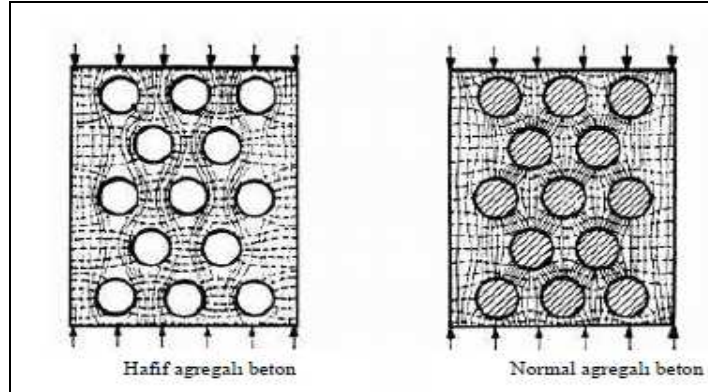
Genel olarak hafif agregalı betonlardaki dayanım artışı, betonda kullanılan agreganın birim hacim ağırlığıyla ilişkilidir. Diğer bir ifadeyle, agreganın yoğunluğu arttıkça hafif betonun dayanımı da arttırılabilir (Uygunoğlu, 2008).

Tablo 2.6'da ACI 213R-87' e göre hafif agregalı betonun basınç dayanımı ve çimento içeriği arasındaki yaklaşık ilişki verilmiştir. Daha yüksek basınç dayanımları için çok daha yüksek çimento dozajları gerekir. Örneğin 70 MPa dayanım için 630 kg/m³ bağlayıcı gerekir. Normal ağırlıklı betonda olduğu gibi silika dumanı hafif agregalı betonun dayanımını geliştirir. Diğer bağlayıcı malzemeler de hafif agregalı betonda kullanılabilir.

Tablo 2.6 Hafif agregalı betonun basınç dayanımı ve çimento içeriği arasındaki yaklaşık ilişki

Standart silindir basınç dayanımı (MPa)	Çimento dozajı (kg/m ³)	
	Hafif ince agregalı	Normal ince agregalı
17	240-300	240-300
21	260-330	250-330
28	310-390	290-390
34	370-450	360-450
41	440-500	420-500

Hafif agregaların dayanımları harç dayanımından daha düşük olduğundan, gelen yük çimento harcı tarafından taşınıp, hafif agregalar tarafından aktarılmaktadır (Hüsem, 2003). Dolayısıyla kırılma, betona uygulanan yüke paralel olarak düz çizgiler halinde oluşmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Hafif ve normal betonda gerilme dağılımlarının gösterimi (Hüsem, 2003).

Normal agregalı betonlarda ise durum farklıdır. Normal agregaların dayanımı harç dayanımından çok daha yüksektir. Dolayısıyla beton üzerine gelen yük çimento harcı tarafından aktarılmakta ve yük agregalar tarafından taşınmaktadır. Dolayısıyla normal agregalı betonlarda basınç yükü altındaki bir beton numunede oluşan gerilmeler, köşelerden numunenin orta kısmına doğru olmaktadır.

Diğer yandan yarmada çekme dayanımında yapılan deneylerde kırılmanın iri agrega taneleri boyunca gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durumda hafif betonda agrega-matris aderansının iyi olduğunu gösterir (Neville, 1995).

TS EN 206-1'e göre sınıflandırmada, çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan silindir şekilli numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı (f_{ck} , sil) veya kenar uzunluğu 150 mm olan küp şekilli numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı (f_{ck} , küp) kullanılabilir. TS EN 206-1'e göre hafif betonlar basınç dayanımlarına göre Tablo 2.7' de sınıflandırılmıştır.

Tablo 2.7 Hafif betonun basınç dayanım sınıfları

Basınç Dayanım sınıfı	En düşük karakteristik silindirik dayanımı MPa	Endüşük karakteristik küp dayanımı MPa
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

2.5.5 Elastisite Modülü

Bir malzemeye yük uygulanması sonucu şekil değiştirmeler meydana gelecektir. Uygulanan yük kaldırıldığı zaman malzeme ilk şekline dönebilir yada yeni kazandığı şekliyle kalabilir. Yükün kısa sürede veya uzun sürede yüklenmesi sonucu olacak şekil değiştirmeler farklı nitelikte olacaktır. Bu şekil değiştirme şayet kalıcı olursa buna plastik şekil değiştirme, yük kalkınca tekrardan eski haline geri dönüyorsa elastik şekil değiştirme denir. Malzemelerin çoğu yük altında elastik sınır aşıldıktan sonra plastik sınıra geçer. Betonda elastik sınır yaklaşık olarak kırılma değerinin üçte biri şeklinde düşünülebilir. Elastik şekil değiştirmenin zamandan bağımsız olduğu yani gerilme uygulanır uygulanmaz ani olarak yer aldığı kabul edilir. Tek eksenli yüklemde bu bağıntı $\sigma = E \cdot \epsilon$ (Hooke Kanunu) şeklindedir ve elastisitenin temel kanununu teşkil eder. “E” elastisite modülünü temsil eder (Postacıoğlu 1975).

Betonun basınç dayanımını ve σ - ϵ ilişkisini etkileyen bütün değişkenler, elastisite modülünü de etkiler. Bu nedenle beton gibi elastik, doğrusal olmayan ve zamana bağlı deformasyon gösteren bir malzemenin elastisite modülünü doğru ve kesin olarak tanımlamak olanaksızdır. Hesap için önerilecek elastisite modülünü, bütün

değişkenleri dikkate alarak tanımlamak elbette pratik olmayacaktır. Bugün çeşitli ülkelerde yürürlükte olan yönetmeliklerde elastisite modülü, beton basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Bazı yönetmeliklerde verilen bağıntıda hafif beton da işin içine katıldığından, beton ağırlığı da dikkate alınmaktadır. Geliştirilen bu bağıntılar ani yükleme durumlarında geçerlidir ve zaman etkisinden bağımsızdır (Uzbaş, 2008).

Betonun elastisite modülü, matrisin elastisite modülüne, agrega tipine, su/bağlayıcı oranına ve çimento hacmine bağlıdır. Betonun sahip olduğu en yüksek gerilme değeri azaldıkça, sahip olduğu doğrusal bölge de gerilme değerine bağlı olarak azalmaktadır. Buna bağlı olarak da elastisite modülü daha düşük değerler almaktadır. Diğer bir ifadeyle, hafif betonun sahip olduğu en yüksek gerilme değeri artıkça betonların aynı gerilme altındaki şekil değiştirme yetenekleri azalmaktadır. Normal betonla karşılaştırıldıklarında ise, hafif agregaların daha kırılğan yapıda olmalarından dolayı, aynı bileşenlere sahip olsalar bile normal agregalı betondan daha düşük basınç gerilmesine sahip olmaktadırlar. Dolayısıyla aynı gerilmeler altında hafif betonların şekil değiştirme yetenekleri de daha fazla olmaktadır. Sonuç olarak hafif agregalı betonların elastisite modülü değerleri normal agregalı betonların sahip olduğu elastisite modülüne göre daha düşük değerler almaktadır (Haque ve diğer., 2004).

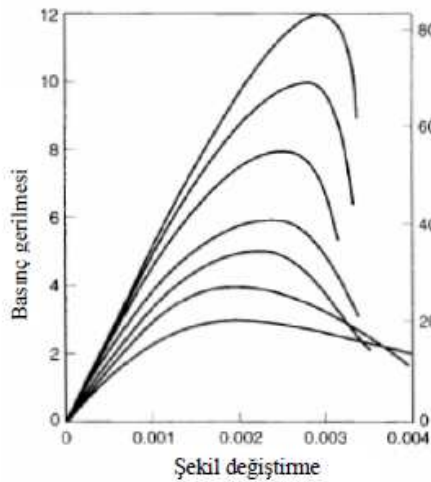
Basınç dayanımı ve birim hacim ağırlığı artmasıyla birlikte elastisite modülleri de artmaktadır. Hafif betonlardan elde edilen elastisite modüllerinin, eşdeğer küp dayanımı aynı olan normal ağırlıklı betonlar ile kıyaslandığında (TS 500 'deki karakteristik elastisite modülü değeri ile) %30-40 'ı oranlarında düşük olduğu ortaya çıkmaktadır. En büyük fark, en hafif betonda görülmüştür (Kadiroğlu, 2004).

Agreganın elastik özellikleri betonun elastisite modülünde normal betonda olduğundan daha büyük bir etkiye sahiptir. Hafif agregalı betonun elastisite modülünü kendisinin basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Hafif agregalı betonun düşük elastisite modülü aynı dayanımdaki normal betona göre daha fazla birim deformasyon yapmasına olanak taşır.

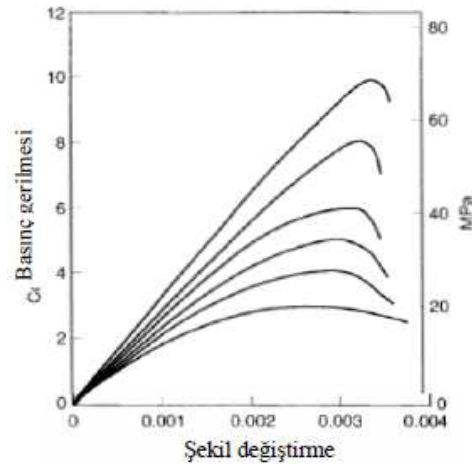
2.5.6 Gerilme-Şekil Değiştirme ($\sigma - \epsilon$) Eğrisi ve Özellikleri

Malzemelerin mekanik davranışı incelenirken homojen ve sürekli ortamlar oldukları varsayılır ve parça boyutlarından soyutlamak için kuvvet yerine kuvvet şiddeti anlamına gelen gerilme, boyutlarda oluşan değişimler yerine deformasyon (şekil değiştirme) oranı göz önüne alınır. Gerilme birim alana etkiyen kuvvet, deformasyon oranı da birim boydaki değişimdir (Onaran, 1991).

Normal beton ve hafif beton için gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 2.3 ve Şekil 2.4' de verilmiştir. Normal betonda basınç dayanımının yaklaşık üçte birine kadar eğri doğrusal olarak artmaktadır. Bu nokta orantı sınırı olarak adlandırılmaktadır. $\sigma - \epsilon$ eğrisi bu noktadan (orantı sınırından) sonra doğrusal (lineer) davranıştan sapmaktadır. $\sigma - \epsilon$ eğrisinin eğriliği, gerilme, basınç dayanımının %85 seviyesinden sonraki gerilmelere ulaşıktan sonra hızlı bir şekilde artmaktadır. Şekil değiştirme dayanıma bağlı olarak normal betonlar için yaklaşık olarak 0,002 civarındadır (Uzbaş, 2008).



Şekil 2.3 Normal beton ($\sigma - \epsilon$) eğrisi



Şekil 2.4 Hafif beton ($\sigma - \epsilon$) eğrisi

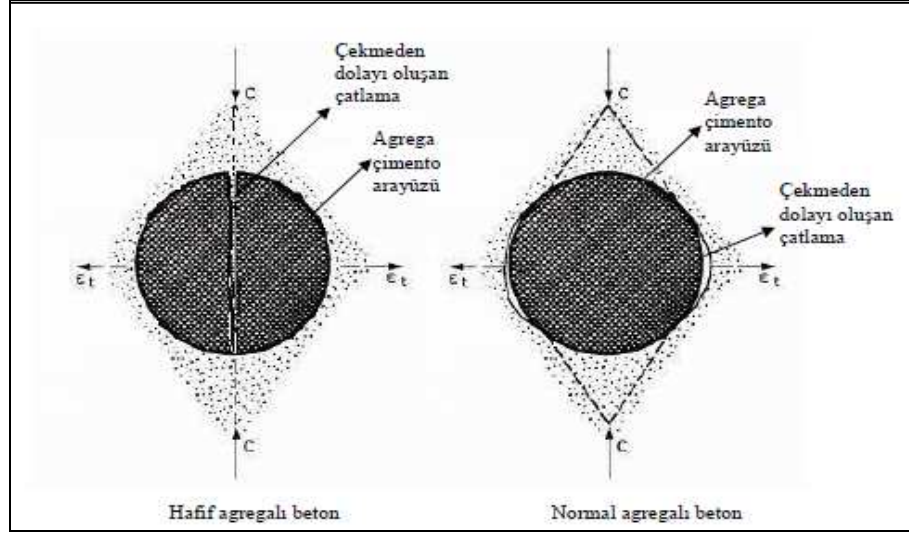
Hafif agrega ve matris arasında çok iyi bir aderans olduğundan dolayı erken mikro çatlak gelişimi yoktur. Bunun sonucunda Şekil 2.4' te görüldüğü gibi gerilme birim şekil deformasyon eğrisi dayanımın yaklaşık olarak %90'ına kadar doğrusaldır. Bu doğrusallık agrega-matris arasındaki matrisin güçlü olmasından

kaynaklanmaktadır. Yine aynı şekilde görüleceği gibi normal betonda şekil değişimi 0,002 iken bu değer hafif betonda 0,003 lere kadar çıkmaktadır. Yani aynı gerilme değeri altında hafif beton normal betona göre daha fazla şekil değişimi sergilemektedir.

2.5.7 Agregas- Matris Aderansı

Hafif betonlarda iç gerilme transferi ve kırılma mekanizması açısından normal betonunkinden büyük oranda ayrılır. Hafif beton içerisindeki agregalar normal betondaki harç matrisinden daha az sertliğe sahiptir. Bu nedenle basınç yükleri genel olarak agrega ve matris arasındaki sertlik ilişkisine göre harç matrisindeki sertliği ile açıklanmaktadır (Faust, 1997).

Hafif agregalı betonun önemli bir özelliği, agrega ile onu çevreleyen hidrate çimento pastası arasındaki yüksek aderanstır. Bu durum birkaç faktörün sonucudur. Birincisi, çoğu hafif agregaların pürüzlü yüzey yapısı iki malzeme arasındaki iyi bir mekanik kilitlenme sağlar. Gerçekte çimento pastasının iri agregaların yüzeyindeki açık boşluklara penetrasyonu söz konusudur. İkincisi, hafif agrega tanelerinin ve sertleşmiş çimento pastasının elastisite modülleri birbirlerine göre çok farklılık göstermez. Sonuçta iki malzeme arasında gerek uygulanan dış yükten gerek termal değişimlerden dolayı farklı gerilmeler oluşmaz. Üçüncü olarak, karıştırma sırasında agrega tarafından absorblanan su zamanla hidrate olmamış çimento kısmının hidratasyonu için kullanılabilir. Böylece ilave hidratasyonun büyük bölümü agrega-çimento pastası arayüzeyinde gerçekleştiğinden aderans daha güçlü hale gelir (Neville, 1995).



Şekil 2.5 Hafif ve normal agregaların sematik gösterimi (EuroLightCon, 1998)

Normal agregalı betonlarla karşılaştırıldığında, hafif agregalı betonların basınç ve çekme dayanımları daha düşüktür. Bunun nedeni de, beton üretiminde kullanılan agregaların dayanımıdır. Hafif agregalı betonlarda, agrega üzerine yük aktarıldığında, agreganın dayanımı çimento harcının dayanımından daha düşük olmasından dolayı kırılma işi agrega-çimento ara yüzü yerine agregada başlar. Normal agregalı betonlarda ise normal agreganın dayanımı harç dayanımından daha fazla olmasından dolayı kırılma işlemi normal betonda en zayıf bölge olan agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde oluşmaya başlar (Şekil 2.5). Hafif ve normal agregaların yük altındaki davranışlarının farklı olmasından dolayı bu agregalarla üretilen betonların da üzerindeki gerilim dağılımları da farklı olmaktadır (Uygunoğlu, 2008).

BÖLÜM ÜÇ

PUZOLANİK MALZEMELER

3.1 Puzolanların Tanımı ve Genel Sınıfları

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan, 2003). Puzolanların yapısında yer alan silisin ve alüminin yanısıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunmaktadır. Puzolanlar iki genel gruba ayrılmaktadır:

1. *Doğal puzolanlar* : Doğada bulunan volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, ısıtılmış işlem görmüş killer ve şeyller, ve diatomlu topraklar bu grup içerisindeki puzolanlardır.

2. *Yapay puzolanlar* : Bunlar endüstriyel yan ürünlerdir. Uçucu küller, silis dumani ve granüle yüksek fırın cürufu yapay puzolanlardır.

3.1.1 Puzolanik Reaksiyon

Puzolanların kompozisyonu büyük ölçüde silis ve alümininden oluşmaktadır. İnce daneli durumdaki puzolanlar, söndürülmüş kireç ve suyla birleştirildiğinde, bu malzemeler arasında birtakım kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır. Kalsiyumhidroksit, silis ve su arasındaki reaksiyonlar, aynen Portland çimentosunun hidrasyonunda olduğu gibi hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip kalsiyum-silikahidrat (C-S-H) jellerinin oluşmasına yol açmaktadır. (Erdoğan, 2003).

3.1.2 Puzolanik Aktiflik

Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği “puzolanik aktivite” olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için,

yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis + alümin+ demiroksit” içermesi gerekmektedir. Puzolanik aktivite “dayanım aktivite indeksi” olarak adlandırılan bir değer hesaplanmasıyla ifade edilmektedir. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Erdoğan, 2003);

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = (A/B) \times 100$$

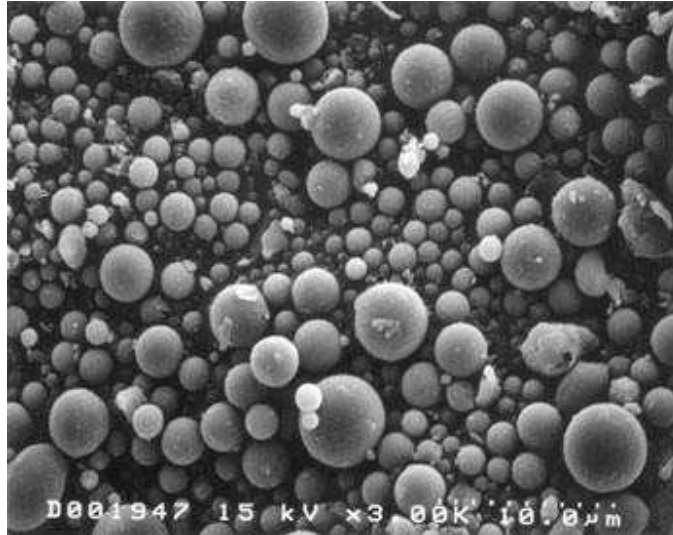
Burada;

A= Puzolanlı harç numunelerin ortalama basınç dayanımı,

B= Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır.

3.2 Uçucu Kül

Uçucu kül, toz halinde veya öğütülmüş taşkömürü veya linyit kömürünün, yüksek sıcaklıklarda yanması sonucunda oluşan ve baca gazları ile sürüklenen, silis ve alümino - silisli toz halinde bir yanma kalıntısıdır (TS 639). Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Elektron mikroskopunda çekilmiş uçucu kül

Genellikle, termik santrallerde yakılan taş kömürlerinin %10-15'i, linyit kömürlerinin ise %35-40'ı küldür. Kömüre dayalı termik santrallerin sayısının gün

geçtikçe çoğalması kül üretiminin artmasına ve beraberinde önemli ekolojik, ekonomik ve teknik sorunları da getirmesine yol açmaktadır. Termik santralin 1 kWh'lik enerji üretiminde yaklaşık 110 g kül atık madde olarak açığa çıkmaktadır. 1000 MW'lık bir santralden yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Dolayısıyla bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması çevre kirliliğinin yanısıra işletme, enerji üretim kaybı vb. konularda parasal ve teknik sorunlar yaratabilmektedir (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilirler. UK'ler beton teknolojisinde ya çimento ile birlikte doğrudan betona katılarak, ya da betonda kum yerine kullanılabilirler. Çimento üretimi sırasında klinkere katılıp öğütülerek uçucu küllü çimento olarak da değerlendirilebilirler. Kum yerine kullanıldığında özgül yüzey artarsa da kumdan az da olsa tasarruf sağlanır. UK'lerin puzolanik özellikleri de olduğundan bunları çimento yerine kullanmak daha avantajlıdır. UK'ler daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olduklarından bağlayıcı hacminin artmasını ve çimentodan ekonomi yapılmasını sağlarlar. Yapılan araştırmalar ağırlıkça % 20 oranında UK kullanılmasının beton basınç dayanımı açısından olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir (Sümer, 1994).

3.2.1 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Uçucu kül taneciklerinin boyutları 1–150 µm arasında değişiklik göstermektedir. Normal olarak, 2,1–2,7 (ortalama 2,4) g/cm³ yoğunluğa sahiptirler. 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. Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları, ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için, uçucu küller de, aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermektedirler. Kalsiyum hidroksitle sulu ortamlarda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip

olmaktadırlar. O nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar.

ASTM C 618 standardı, uçucu külleri kimyasal bileşimlerine ve elde edildikleri kömür cinsine bağlı olarak C ve F sınıfı olarak sınıflandırmıştır. Kütlece % 10’ dan daha az CaO içeren uçucu küller “düşük kireçli uçucu küller”, % 10’ dan daha fazla CaO içeren uçucu küller ise “yüksek kireçli uçucu küller” olarak adlandırılmaktadır. ASTM C 618’e göre uçucu kül sınıflandırılması aşağıda Tablo 3.1’ de verilmiştir.

Tablo 3.1. Uçucu Kül Sınıfları (ASTM C618’e göre)

Sınıf	Tanım
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \% 70$ bitümlü veya antrasit (parlak kömürden elde edilen uçucu küller). Yalnızca puzolanik özelliğe sahip.
C	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \% 50$ linyit kömüründen elde edilen uçucu kül. Kireç (CaO) içeriği %10 dan fazla olabilir. (Yüksek Kireçli Uçucu Kül). Puzolanik ve bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahip.

TS EN 197-1 ‘ e göre uçucu küller silissi veya kalkersi yapıda olabilir. Silissi uçucu külün puzolanik özellikleri vardır. Kalkersi uçucu külün ise hidrolik özelliklerine ilâveten puzolanik özellikleri olabilir. Silissi V ve kalkersi W uçucu külleri inceleyecek olursak;

a. Silissi uçucu kül (V)

Silissi uçucu kül çoğunluğu 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 kısmı ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikleri ihtiva eder.

b. Kalkersi uçucu kül (W)

Hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif kalsiyum oksit (CaO), reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)’den oluşur. Geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikleri ihtiva eder.

Reaktif kalsiyum oksit oranı kütlece % 10' dan az olmamalıdır. % 10 - % 15 arasında reaktif kalsiyum oksit ihtiva eden kalkersi uçucu külün, reaktif silisyum dioksit muhtevası kütlece % 25' den az olmamalıdır. Tablo 3.2' de Türkiye'de elde edilen bazı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları TS 639 ve ASTM C 618 sınır değerleri ile birlikte verilmiştir.

Tablo 3.2 Türkiye'de bulunan bazı termik santrallerdeki uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları

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

3.2.2 Uçucu Küllerin İnşaat Alanında Kullanımı

Türkiye'de uçucu kül üretimi ve kullanımı 1960'lı yıllarda başlamıştır. Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri incelendiğinde, bunların inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabilceği, malzeme ve enerji üretiminde ekonomi sağlanırken diğer taraftan da çevre kirliliğinin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunması da olasıdır (Ünal ve Uygunoglu, 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 Tablo 3.3'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).

Tablo 3.3 Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullandığı alanlar

Malzeme	Kullanım amacı ve yeri
Çimento	Hammadde, katkı ve ikame malzemesi olarak
Agrega	İnce ,iri 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, boya, seramik, plastik, harç
Uygulamalar	Baraj, otoyol, nükleer santral, geoteknik

3.2.3 Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkisi

Katkı maddesi olarak kullanılan uçucu kül, betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üstüne etki eder. Bu özellikleri karışım suyu, işlenebilirlik, priz süresi, hidrasyon ısısı, terleme, dayanım, sülfata dayanıklılık, alkali agrega reaksiyonu ve betonun ekonomik oluşu olarak sıralayabiliriz. Uçucu külün taze ve kuru haldeki beton üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerini sıralayacak olursak ;

Uçucu Külün Olumlu Etkileri

- İşlenebilirliği olumlu etkiler.
- Su kusmayı azaltır.
- Hidrasyon ısısında düşme sağlar.
- Uzun süre dayanım artışı sağlar.
- Ekonomiklik sağlar.

Uçucu Külün Olumsuz Etkileri

- İlk yaşlarda dayanımı düşüktür.
- Uzun süre küre ihtiyaç duyulur.
- Prizde gecikme yaşanır.

3.2.3.1 İşlenebilirlik

Uçucu küllü betonların işlenebilmesi, katkısız betonlara göre daha iyi olmaktadır. Bunun iki nedeni vardır:

1-) Uçucu külün yoğunluğu portland çimentosunun yoğunluğundan daha azdır. O nedenle, puzolan katkılı 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 arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır.

2-) Uçucu kül taneleri küresel şekillidir. Küresel şekilli tanecikler iç sürtünmeyi azaltmakta, betonun akıcılığını arttırmaktadır. Betondaki bağlayıcı hamurun hacmindeki artış, ve uçucu kül taneciklerinin sürtünmeyi azaltarak betona daha fazla akıcılık sağlamaları, taze betonun pompalanabilirliğini artırmakta, yüzeyinin daha kolay düzeltilebilir olmasına yol açmakta, kalıpları daha kolay sökülebilir duruma getirmektedir (Erdoğan, 2007).

3.2.3.2 Su ihtiyacı

Sabit bir çökme değeri elde edebilmek için uçucu küllü beton karışımının ihtiyacı olan su miktarı, genellikle, katkısız betonunkinden daha az olmaktadır. Yapılan araştırmalarda, çimento ağırlığının %20-30'u azaltılarak onun yerine uçucu kül kullanılan betonların su ihtiyacında yaklaşık olarak %7 kadar daha az su kullanıldığı görülmüştür. Kül taneciklerinin küresel şekilli olmaları, daha az sürtünmeye yol açtığı için, daha az su ihtiyacı olmasına neden olmaktadır. Uçucu küllü betonların su ihtiyacı, uçucu külün inceliğine ve kullanıldığı miktara bağlı olmaktadır. İncelik arttıkça su ihtiyacında artma olmaktadır (Erdoğan, 2007).

3.2.3.3 Priz süresi

Uçucu kül katkılı betonların priz süreleri katkısız betondakinden genellikle daha uzun olmaktadır. Priz süresi, kullanılan uçucu külün tipine ve inceliğine göre değişmektedir. C tipi uçucu küller, F tipi uçucu küllerden daha kısa priz süresi göstermektedir (Erdoğan, 2007).

3.2.3.4 Hidratasyon ısısı

Uçucu kül katkılı betonlarda daha az portland çimentosu yer aldığından, bu tür betonların hidratasyon ısıları, katkısız betonunkinden daha az olmaktadır.

3.2.3.5 Basınç ve Çekme Dayanımı

Katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmasının beton dayanımına etkileri, ince taneli doğal puzolanların etkisine benzemektedir. Normal olarak, ilk zamanlarda, uçucu küllü betonun dayanımı katkısız beton dayanımına kıyasla birazcık daha az olmaktadır. Ancak nihai dayanım oldukça yüksektir (Erdoğan, 2007).

Uçucu küllü betonların mukavemet kazanma hızı, kül içermeyen betonlara oranla daha yavaş olmaktadır. Bu sebeple, uçucu küllü betonlarda ilk yaştaki mukavemetler daha düşük olmakta, ancak uçucu kül aktivitesinin yüksekliğine göre 56, 90. veya daha sonraki günlerde mukavemetler kontrol betonunu yakalamakta veya geçmektedir. C sınıfı uçucu küllerin ilk yaşlardaki mukavemet kazanma hızları daha yüksek olabilmektedir. Uçucu küllü betonlarda en iyi sonuçların genellikle %15-25 arası uçucu kül ikame oranlarında alındığı, C sınıfı uçucu küllerle bu oranın %35'e kadar çıkabileceği belirtilmektedir. Daha yüksek uçucu kül oranları çoğunlukla kütle betonlarında hidratasyon ısısını düşürmek ve çatlamayı azaltmak için kullanılmaktadır (Özturan, 1991).

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

3.2.3.6. Dayanıklılık

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

Uçucu küllü betonların sülfatlara dayanıklılığı katkısız betonlara göre daha fazladır. Çünkü puzolanik katkı maddeleriyle üretilen betonlarda daha az Portland çimentosu yer alacağından, sülfat reaksiyonuna yol açabilecek C_3A miktarı daha az olmaktadır. Ayrıca, puzolan katkılı betonlardaki hidratasyon, önce Portland çimentosu ile su arasında başlamaktadır. Puzolanların reaksiyon gösterebilmeleri; C_3S ve C_2S anabileşenlerinin hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksitin kullanılmasıyla gerçekleşmektedir. Yani puzolan katkılı betonlarda daha az miktarda kalsiyum hidroksit yer almaktadır. Buda, sülfat ve kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyon sonucunda oluşabilecek alçıtaşı miktarının az olmasına neden olmaktadır (Erdoğan, 2003).

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

3.3 Silis Dumanı

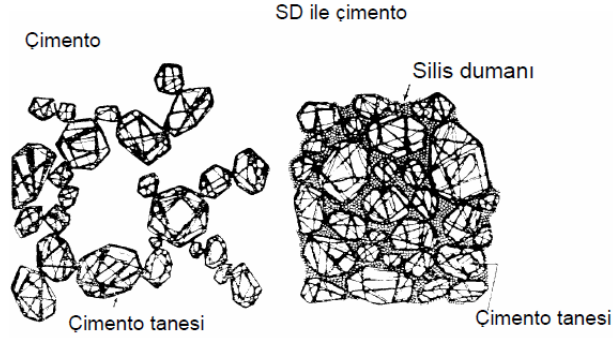
Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen, ana bileşeni 1 µm'den küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO₂) partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür (Koca, 1996).

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımlarının üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars, elektrik fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Üretim işleminde çok büyük miktarı SiO' dan oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO'nun, fırının soğuk bölgelerinde havayla temas etmesiyle ve çok çabuk yoğunlaştırılması ile gazın içerisindeki SiO, amorf yapıya sahip SiO₂ duruma dönüşmektedir (Erdoğan, 2003).

Bu malzeme “mikrosilis” veya “silis tozu” veya “silika füme” gibi isimlerle de anılmaktadır. Silis dumanı amorf, çok ince taneli yapıya sahip olduğundan, ve yüksek miktarda SiO₂ içerdiğinden, mükemmel bir puzolanik malzemedir. Diğer puzolanik malzemeler gibi, kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirildiği takdirde, hidrolik bağlayıcılık gösterir. Genellikle, beton karışımında yer alan çimento miktarı yaklaşık %10 kadar azaltılmakta ve onun yerine bu puzolanik malzeme yerleştirilmektedir. Çok ince taneli olması ve çok yüksek miktarda SiO₂ içermesi nedeniyle gerek ilk zamanlarda gerekse nihai olarak oldukça yüksek dayanımlı betonların elde edilebilmesinde kullanılmaktadır. Silis dumanının çok ince tanelerden oluşmuş olması taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltmakta, su ihtiyacını artırmaktadır. O nedenle, yüksek dayanımlı beton üretimi için katkı maddesi olarak silis dumanı kullanıldığı zaman, ayrıca, su-azaltıcı katkı maddesi de kullanılmaktadır (Erdoğan, 2003).

Silis dumanı başta Norveç olmak üzere Avrupa ve ABD'de yaygın biçimde kullanılmakta olup iki işleve sahiptir; birincisi betondaki boşlukları doldurma, diğeri ise puzolanik etkidir.

Silis dumanı gibi ultra incelikteki tanelerin kullanımıyla beton içerisindeki boşluklar azaltılmakta ve betonun stabilitesi gelişmektedir (Şekil 3.2). Silis dumanı tanecikleri kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı, dolayısıyla betonun dayanımını ve durabilitesini artırmaktadır.



Şekil 3.2 Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi (Hjorth, 1983)

3.3.1 Silis Dumanının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Silis dumanını oluşturan taneciklerin boyutları 0,1-0,2 μm kadardır. 45 μm boyutlu elekten elendiğinde, elek üzerinde kalan taneler aşırı büyük boyutlu taneler olarak kabul edilir. Silis dumanında olduğu gibi çok ince taneli cisimlerde özgül yüzey Azot Adsorpsiyon (BET) metodu ile tayin edilebilmektedir. Silis dumanının özgül yüzeyi 130,000-280,000 cm^2/g arasında değişmektedir. Beton katkı maddesi olarak kullanılan silis dumanının özgül yüzeyi genellikle 200,000 cm^2/g civarındadır. Silis dumanının ne kadar ince taneli olduğunu daha iyi açıklayabilmek amacıyla aşağıda silis dumanın ve bazı malzemelerin özgül yüzeylerine dair değerler verilmektedir (Erdoğan, 2003).

- Silis Dumanı : ~ 200.000 cm^2/gr
- Tütün Külü : ~ 100.000 cm^2/gr
- Uçucu Kül : 4.000~7.000 cm^2/gr
- Normal Portland Çimentosu : 3.000 cm^2/gr .

Silis dumanının özgül ağırlığı $2,2 - 2,3 \text{ g/cm}^3$ kadardır. Birim ağırlığı ise $240-300 \text{ kg/m}^3$ civarındadır.

Silis dumanından istenen etkinliğin sağlanabilmesi için gerekli bazı fiziksel ve kimyasal özellikler aşağıda verilmiştir. ABD, Norveç ve Türkiye’de Antalya ferrosilikon tesislerinden elde edilen bazı silis dumanlarının kimyasal bileşenleri Tablo 3.4’de verildiği gibidir (Erdoğan, 2003).

Tablo 3.4 Silis dumanının kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşen	ABD	Norveç	Türkiye
SiO ₂	90.0 - 93.0	90.0-96.0	93.0 - 95.0
Fe ₂ O ₃	0.4 - 0.7	0.2 - 0.8	0.4 - 1.0
Al ₂ O ₃	0.5 - 1.6	0.5 - 3.0	0.4 - 1.4
MgO	0.3 - 0.5	0.5 - 1.5	1.0 - 1.5
CaO	0.5 - 0.8	0.1 - 0.5	0.6 - 1.0
Na ₂ O	0.1 - 0.3	0.2 - 0.7	0.1 - 0.4
K ₂ O	1.0 - 1.2	0.4 - 1.0	0.5 - 1.0
S	0.1 - 0.2	0.1 - 0.4	0.1 - 0.3
C	1.3 - 2.6	0.5 - 1.4	0.8 - 1.0
Kızdırma kaybı	1.4 - 2.8	0.7 - 2.5	0.5 - 1.0

Silis dumanındaki “SiO₂, Fe₂O₃ ve Al₂O₃’nın yüksek olması puzolanik aktivitenin daha iyi olmasına neden olur.

3.3.2 Silis Dumanının Betonun Özelliklerine Etkisi

Silis dumanının beton üretiminde kullanılmasıyla elde edilen olumlu etkileri ve potansiyel zararlı etkiler maddeler halinde aşağıda özetlenmiştir (Erdoğan, 2003):

Silis Dumanının Olumlu Etkileri

- Betonda yüksek basınç dayanımı elde edilmesini sağlamaktadır.
- Taze betondaki terlemeyi ve ayrışmayı azaltmaktadır.
- Betonun hidratasyon ısını azaltmaktadır.
- Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır.

- Sertleşmiş betondaki alkali-silika reaksiyonunu azaltmaktadır.
- Sertleşmiş betonun sülfatlara karşı dayanıklılığını artırmaktadır.

Silis Dumanının Olumsuz Etkileri

- Silis dumanı kullanarak üretilen betonların yüksek miktarda karışım suyu ihtiyacı vardır. Bunu telafi edebilmek için su azaltıcı katkılarla birlikte kullanılmaları gerekmektedir.
- Silis dumanı çok ince taneli olduğundan ve terlemeyi azalttığından, betonun yüzeyinin düzeltilmesi işlemi daha zor olabilmektedir.
- Silis dumanı kullanılması durumunda, daha çok miktarda plastik büzülme çatlacağına yol açabilmektedir.
- Silis dumanı, nispeten daha koyu renkli beton elde edilmesine neden olmaktadır.

3.3.2.1 İşlenebilirlik

Silis dumanlı beton, sadece Portland çimentosu ile yapılmış olan betondan çok daha koheziftir. Gerek yüksek kohezyondan ve gerekse ince katı taneciklerin arasında daha çok temas olmasından, silis dumanlı betonların işlenebilmesi azdır. Betona katılan silis dumanının oranı çimento ağırlığının %5'inden daha yukarılara çıktıkça, beton daha yapışkan olmaktadır (Erdoğan, 2003).

3.3.2.2 Su İhtiyacı

Silis dumanı tanelerinin çok ince olmasından dolayı, belirli bir çökme değeri için betonun su ihtiyacı artmaktadır. Bu yüzden, betonda daha az su kullanmak amacıyla, silis dumanlı katkılarla yapılan betonlarda su azaltıcı katkı malzemelerinin de kullanılması gerekmektedir. Genel olarak, her 1 kg/m³ silis dumanı katkısı için, taze betondaki su ihtiyacı yaklaşık olarak 1 lt/ m³ kadar artmaktadır (Erdoğan, 2003).

3.3.2.3 Priz süresi

Silis dumanının çok ince taneli olması ve yüksek oranda SiO_2 içermesi, puzolanik reaksiyonların çok erken yaşlarda başlamasına neden olmaktadır. Araştırmalar, puzolanik reaksiyonların, çimentonun hidrasyonunun başlangıcından bir gün sonra başladığını, 3. günden sonra belirgin hale geldiğini ve 28. günde büyük ölçüde tamamlandığını göstermiştir (Çark ve Sümer, 1996). Silis dumanı katkılı çimento hamurları genellikle daha geç priz alırlar. Katkı miktarı çimento ağırlığının %10'unu geçmedikçe bu etki önemsenmeyebilir. Betonda kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkıların da priz süreleri üzerinde etkileri mevcuttur. Örneğin, çimentoyla %15 oranında yer değiştirilen silis dumanı katkılı ve süper akışkanlaştırıcı betonlarda, priz başlangıç ve bitiş süresinde sırası ile 1 ve 2 saatlik uzamalar gözlenmiştir (Khayat ve Aitcin, 1992).

3.3.2.4 Hidratasyon ısısı

Çimento ağırlığının %7-%10'u kadar silis dumanı kullanılarak yapılan betonların ilk 72 saat içerisindeki hidrasyon ısısı, silis dumanı kullanılmayan betonlardan biraz daha fazla olabilmektedir. Ancak, silis dumanlı betonlarda, silis dumanı kullanılmayan betonlarınkine göre, yaklaşık %8-%10 kadar daha az hidrasyon ısısı çıkmaktadır (Erdoğan, 2003).

3.3.2.5 Basınç ve Çekme Dayanımı

Silis dumanının betona ilavesi basınç dayanımını oldukça arttırmaktadır. Silis dumanının betondaki boşlukları doldurma ve puzolanik etki olmak üzere iki işlevi vardır. Bunlardan hangisinin belirleyici olduğu yönünde değişik görüşler vardır (Bentur ve diğer., 1993). Ancak silis dumanının puzolanik etkisinin betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega-çimento hamuru temas yüzeyini güçlendirmede önemli olduğu, mikroyapısal ve mekanik incelemelerle kanıtlanmıştır (Taşdemir, 1996).

Silis dumanı ilavesiyle betonun dayanımının artmasının esas nedenleri kullanılan silis dumanının miktarına, su-bağlayıcı oranına, bağlayıcı malzeme miktarına, çimento tipine, su azaltıcı katkının cinsine, kür durumuna ve zamana bağlanmaktadır. Silis dumanı kullanılarak elde edilen betonda optimum basınç dayanımını elde edebilmek için, silis dumanının miktarının ve akışkanlaştırıcının dozajının uygun oranlarda olması gerekmektedir. Akışkanlaştırıcı kullanmadan üretilen silis dumanı betonunun su ihtiyacı sabit işlenebilirlik için direk olarak silis dumanı miktarına bağlıdır. Genel yapılarda kullanmak için silis dumanının dozajı genelde %7 ile %10 arasında değişir. Bazı özel durumlarda ise %15'e kadar silis dumanı başarılı bir şekilde kullanılmıştır (Akçaözoğlu, 2007).

Silis dumanı taneleri, CSH jelleri oluşturmasının dışında, çimento hamurunu agrega-hamur ara yüz geçiş bölgesini sıkılaştırıp kuvvetlendirerek beton dayanımını artırmaktadır. Buna karşın belirli bir işlenebilirlik için su gereksiniminin artması gibi olumsuz etkileri de olabilmektedir. Betondaki optimum silis dumanı miktarı bu etkilerin göreceli değerlerine bağlıdır ve çimento, agrega ve akışkanlaştırıcı katkının tipi ve miktarları ile bakım koşulları gibi faktörlerden etkilenmektedir (Jahren, 1993).

Bhanja ve Sengupta (2005), diğer karışım parametreleri sabit tutularak silis dumanı miktarının artırılmasıyla, eğilme dayanımında kayda değer bir artışın olduğunu belirtmişlerdir. Optimum 28 günlük çekme dayanımının %5-10 silis dumanı yer değişimiyle, eğilme dayanımının ise %15-25 silis dumanı-çimento yer değişim oranında elde edildiğini bildirmişlerdir.

Silis dumanı katkılı betonlarda çekme veya eğilme dayanımlarının basınç dayanımına oranı, katkısız betonlardakine benzemektedir. Basınç dayanımı arttıkça, çekme ve eğilme dayanımları da artar. Silis dumanı miktarının artması veya süper akışkanlaştırıcı kullanılmaması, eğilme-basınç dayanımları orantısının katkısız betonlardakinden daha küçük olmasına yol açmaktadır (Khayat ve Aitcin, 1992).

3.3.2.6 Dayanıklılık

Silis dumanı içeren betonların, portland çimentosuna göre daha az geçirimli olduğu bulunmuştur. Toplam porozitenin yaklaşık aynı kalmasına rağmen, çimento silis dumanı hamuru içindeki büyük gözeneklerin azalması nedeniyle hamurun daha homojen olduğu ve geçirimliliğin azaldığı düşünülmektedir (Yeğınobalı, 1993).

Betonun geçirgenliği ve Ca(OH)_2 içeriği betonun birçok kimyasala karşı direncinde rol oynayan iki faktördür. Silis dumanı %12'den %20'ye kadar yüksek oranlarda kullanılarak Ca(OH)_2 içeriği ve geçirgenliliğin azaltılması sağlanmaktadır. Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında, yüksek dozlu silis dumanının betonda kullanımının betonun direncini amonyum nitrat, sülfürik asit, hidroklorik asit, asetik asit, laktik asit, gibi birçok solüsyona karşı iyileştirdiği bulunmuştur (Malhotra, 1997).

Yüksek oranda alkali içeren çimento ve reaksiyona hazır agreganın mevcudiyetinde silis dumanı ilavesiyle üretilen (%5-%10) betonlarda alkali-silika reaksiyonunun bozuculuğu önlenmiş ya da geciktirilmiştir (Akçaözoğlu, 2007).

3.4 Yüksek Fırın Cürufu

Çeşitli metalürji tesislerinden elde edilen yan ürünlerden birisi de, ham demirin üretimi esnasında atık madde olarak ortaya çıkan cüruflardır. Cürufların kimyasal kompozisyonları ve özellikleri, elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim tekniğine de bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir. Örneğin, yüksek fırın cüruflarının kendi başına da bağlayıcılık özelliği olmasına karşın, bakır ve nikel cürufları sadece puzolanik özellik gösterirler (Tokyay, 2003).

Cürufların, çimento ve beton sektörlerinde çok çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır. Geleneksel çelik üretim teknikleriyle elde edilen cüruflar, kristal yapıda olduklarından ya hiç kullanılmaz ya da dolgu malzemesi olarak yollarda ve betonda kullanılır. Buna karşılık, modern çelik üretimi yapan tesislerden elde edilen

cüruflar, camsı (amorf) yapıya sahip olduklarından, bunları çimentolu sistemlerde kullanmak mümkündür. Tüm cüruflar arasında en önemlisi ve en yaygın kullanıma sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır. Fırınlarda en yaygın olarak kullanılan yakıt kok kömürü olup, cevherin yabancı maddelerden arındırılmasına yardımcı olması için flux madde olarak bir miktar kalker taşı da cevherle birlikte üst uçtan fırına girmektedir. Kok kömürünün karbonu, cevherin içerisindeki demiroksitin oksijeniyle birleşerek karbondioksit ve karbonmonoksit olarak fırından ayrılır. Böylece, geride eriyik durumdaki demir ile birlikte, kireç, kok kömürünün külü, silis, alümin, karbon, mangan, fosfor ve sülfür gibi yabancı maddelerden oluşan ve “cüruf” adı verilen malzeme topluluğunu bırakır. Yoğunluk farkından dolayı, demir ve cüruf ayrı çıkışlarla dışarı alınmaktadır. (Bilim, 2006).

Fırından çıkarılan cüruf yaklaşık olarak 1400–1600°C sıcaklıkta olduğu için, kullanılmadan önce soğutulması gerekmektedir. Uygulanan soğutma tekniklerine de bağlı olarak cüruf farklı özellikler kazanmaktadır. Cürufun uygun bir forma getirilmesi ve bağlayıcı bir malzeme olarak kullanılması için granülasyon ve peletleme (hava granülasyonu) olmak üzere iki farklı yöntem mevcuttur. Her iki yöntemde de cürufun düzensiz bir camsı yapı kazanması için hızlı bir şekilde soğutulması esastır. Cürufun yavaş bir şekilde soğumasına izin verilmesi durumunda ise, bağlayıcılık değeri olmayan kristal bir yapı ortaya çıkmaktadır (Newman ve Choo, 2003). Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları, sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörlerle bir araya getirildiğinde ya da Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan Ca(OH)_2 ile birleştirildiğinde hidrolitik özelliğe sahip olur. Bu özellikleri nedeniyle, öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarını, cürufllu çimentoların üretiminde veya beton yapımında mineral katkı maddesi olarak kullanmak mümkün olmaktadır.

3.4.1 Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Yüksek fırın cürufları, yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında endüstriyel bir yan ürün olarak üretilir. Demir cevherleri, hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4), limonit ($\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ve siderit (FeCO_3) gibi demiroksit bileşenlerinin yanı sıra aynı

zamanda küçük bir miktar silis, alümin, kil, kükürt, fosfor, mangan gibi yabancı maddeleri de bünyesinde barındırmaktadır (Doğulu, 1998).

Yüksek fırın cüruflarının hidrolük bağlayıcılığı, ne kadar ince öğütülürse o kadar iyi olacağından, Portland çimentosundan daha ince olacak şekilde en az 400 m²/kg inceliğe kadar öğütülmelidir. (Newman ve Choo, 2003). Tablo 3.5' de değişik ülkelerde üretilen yüksek fırın cüruflarının kimyasal bileşimleri gösterilmektedir.

Tablo 3.5 Yüksek fırın cüruflarının kimyasal bileşimleri (Erdoğan, 2003)

Kimyasal Bileşim	ABD Ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye
	%			
CaO	29-50	30-40	39-44	34-41
SiO ₂	30-40	30-36	33-37	34-36
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-19
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5
MgO	0-19	8-21	1-3	3.5-7.0
MnO	0.2-1.5	-	0.3-1.5	1.0-2.5
S	0-2.0	1.0-1.6	0.6-0.8	1.0-2.0

Granüle yüksek fırın cüruflarının hidrolük özelliklerinin belirlenmesindeki önemli parametrelerden birisi de kimyasal kompozisyonlarıdır. Genel olarak, cürufların alkalitesi ne kadar yüksekse hidrolük özelliğinin de o kadar iyi olduğu kabul edilir. Cürufların kimyasal kompozisyonlarıyla hidrolük özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmış olmakla birlikte, kesin ve basit kurallar bulunmuş değildir (Tokyay ve Erdoğan, 1997).

Bir granüle yüksek fırın cürufunun hidrolük özelliği, belirli bir sınır değere kadar CaO/SiO₂ oranının artmasıyla artar. Ancak bu sınır aşıldığında, diğer bir deyişle, CaO miktarının çok yüksek olması durumunda granülasyon güçleştiğinden dolayı hidrolük özellikte azalma görülür. Sabit bir CaO/SiO₂ oranı için Al₂O₃ miktarının artması cürufun aktivitesini artırır. Cüruf içindeki demir ve mangan oksitler dayanım özelliklerini olumsuz etkiler. %10'a kadar MgO bulunmasının dayanıma olumsuz bir etkisi bulunmaz. Ancak, daha yüksek MgO miktarları zararlı etkiler yaratabilir (Tokyay ve Erdoğan, 1997).

Granüle yüksek fırın cüruflarının kendi başlarına suyla yaptıkları reaksiyon, Portland çimentolarının hidrasyonu ile karşılaştırıldığında, oldukça yavaş geliştiğinden, araştırmacılar, ağır seyreden bu hidrasyon hızını yükseltebilmek için bu reaksiyonları hızlandıracak çalışmalara yönelmiştir (Tokyay, 2003). Yapılan çalışmalar cürufların; aktivatörlerle veya bir miktar Portland çimentosuyla birlikte kullanılabilmesini ve uygulamalarda kullanılacak güçlü bir çimento hamuru meydana getirmek amacıyla, alkali hidroksitlerin yalnız başlarına, yani Portland çimentosundan gelen kalsiyum hidroksit olmadan da, öğütülmüş yüksek fırın cüruflarıyla hidrasyona girebileceğini göstermiştir (Erdoğan, 2003).

3.4.2 Yüksek Fırın Cürufunun Beton Özelliklerine Etkileri

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton üstündeki olumlu ve olumsuz etkilerini özetleyecek olursak (Erdoğan, 2003):

Yüksek Fırın Cürufunun Olumlu Etkileri

- Taze betondaki işlenebilmeyi artırmaktadır.
- Taze betonun priz süresini uzatmaktadır.
- Betondaki terlemeyi azaltmaktadır.
- Betonun hidrasyon ısını azaltmaktadır.
- Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır.
- Sertleşmiş betonun sülfat dayanıklılığını artırmaktadır.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun olumsuz yanları

- Betonun özellikle soğuk havalarda daha geç priz almasına yol açmaktadır.
- Betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok hava sürükleyici katkı maddesine ihtiyaç olmaktadır.
- İlk zamanlarda beton dayanımı artışı daha yavaş tempoda yer almaktadır.

3.4.2.1 İşlenebilirlik ve Su İhtiyacı

Yüksek fırın cürüflu betonlar, aynı slump değeri için, Portland çimentoları ile yapılmış betonla kıyaslandıklarında, azaltma miktarı %3'ten fazla olmamasına rağmen, daha düşük su ihtiyacı gösterirler. Bu azalma, çoğunlukla, cüruf partiküllerinin pürüzsüz yüzey dokusuyla ve kimyasal reaksiyonlarda meydana gelen gecikmeyle ilgilidir (Newman ve Choo, 2003).

Yüksek fırın cürufunun klinkere göre daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının düşük olması sebebiyle hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesinden dolayı, cüruf katkılı betonların işlenebilirliği artmaktadır. Ancak bu artış çökme deneyi sonuçlarında tam olarak gözlenememektedir (Wainwright, 1986; Tokyay, 2003).

3.4.2.2 Terleme

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının kısmi olarak Portland çimentosuyla yer değiştirilerek kullanılmasının, hidrasyon hızında azalmaya yol açarken, terleme miktarını ve hızını arttırdığını bildirmişlerdir. Bu artışın ana nedeninin, çimento hamurundaki cürufun hidrasyon mekanizmasında gecikmeye yol açması ve böylece hidrasyon ürünlerinin gelişimindeki azalma olduğu düşünülmektedir (Wainwright ve Ait-Aider, 1995).

3.4.2.3 Hidrasyon Isısı

Cürufların beton içerisinde kullanılması, hidrasyon ısısını azaltarak hem maksimum beton sıcaklığını düşürmekte hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır. Ayrıca yüksek fırın cürufu ile birlikte sıcaklık değişim oranı, artan cüruf oranı ile birlikte azalmaktadır. Bu özellik, yüksek sıcaklıkların ortaya çıkmasına engel olduğu için büyük kütle betonlarının dökümünde faydalı olmaktadır. Uygulamada elde edilen sıcaklık azalmaları asıl olarak kesit büyüklüğü, çimento

miktarı, cüruf oranı, bağlayıcı bileşenlerin inceliği ve kimyasal kompozisyonu gibi birçok faktöre bağlıdır (Bilim, 2006).

3.4.2.4 Priz Süresi

Yüksek fırın cüruflarının, Portland çimentolarına göre suyla daha yavaş reaksiyona girmesinden dolayı beton içerisinde cüruf kullanımı, betonun priz zamanında bir artışa neden olmaktadır. Prizlenme zamanında meydana gelen bu uzama, %50'den yukarıdaki yüksek yer değişim oranlarında ve 10°C'den düşük sıcaklıklarda daha fazla olmaktadır (Akçaözoğlu, 2008).

3.4.2.5 Basınç Dayanımı

Erken yaşlarda, yüksek fırın cürüflü betonların dayanım değerleri kontrol betonuna göre düşüktür. Bunun sebebi, cüruf katkılı betonların, normal Portland çimentosu içeren betonlara göre, dayanım kazanma mekanizmalarının daha yavaş olmasıdır. Çünkü, YFC, reaksiyona girmek için çimentonun reaksiyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ve neme ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple, YFC'nun hidratasyonu, çimentonun hidratasyonundan daha sonra başlamaktadır (Akçaözoğlu, 2008).

Cüruf yer değiştirme oranı arttıkça, mukavemet gelişim oranı da düşmektedir. Ancak, uygun bir nemli ortam ve uygun bir sıcaklık sağlandığında, cürüflü betonların uzun dönem mukavemeti genel olarak Portland çimentosu içeren betonlardan daha yüksek olmaktadır (Brooks ve diğer.,1992; Soroka, 1993).

3.4.2.6 Çekme Dayanımı

Cürüflü betonların çekme mukavemetleri kontrol betonlarıyla karşılaştırıldığında, ya biraz daha düşük ya da kıyaslanabilecek seviyededir. Hem kontrol hem de cürüflü betonların etkili bir şekilde ıslak kür edilmesi, mukavemet gelişimi için oldukça önem taşımaktadır (Fernandez ve Malhotra, 1990).

Cürüflü betonların, aynı basınç dayanımına sahip Portland çimentolu betonlara göre biraz daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğunu belirtmektedirler (Newman ve Choo, 2003).

3.3.2.7 Elastisite Modülü

Yüksek fırın cürüfları, portland çimentosu içeren betonlarla kıyaslandığında, belli bir basınç mukavemeti için betonun elastisite modülünü biraz daha artırıcı etkiye sahiptir (Newman ve Choo, 2003). Ağırlıkça %30-70 oranlarında cüruf içeren ve suda kür edilmiş cürüflü çimento betonlarının sekant elastisite modülleri, erken yaşlarda Portland çimentolu betonlara benzer olmasına karşın, sonraki dönemlerde daha fazla olmaktadır. Ancak, kuru kür edilen cürüflü çimento betonlarının son yaşlardaki elastisite modülleri, ıslak kür edilen cürüflü betonlardan daha düşüktür (Brooks ve ark., 1992).

3.3.2.8 Dayanıklılık

İyi kür edilmiş betonlarda cüruf katkısı, özellikle yüksek sıcaklıklarda, uzun dönem permeabilitesinde faydalı olmaktadır. Bunun muhtemel sebepleri cüruf katkılı betonlarda 28 gün sonrasında da hidrasyonun devam etmesi; artan cüruf içeriğiyle, toplam boşluk dağılımının daha ince olması ve daha küçük boşluk miktarının giderek artması ve artan kür sıcaklığıyla birlikte, Portland çimentolu betonların boşluk yapısı kabalaşırken, cürüflü betonların boşluk yapısının bundan daha az etkilenmektedir. (Bilim, 2006).

Sülfatlı sular, deniz suları, klorlu sular, karbonatlı sular, termal sular, buz çözücü maddeler vb. ile yapılan uzun süreli deneyler sonucunda, iyi kür edilmiş cüruf katkılı betonların zararlı kimyasal etkiler altındaki performanslarının yüksek olduğu belirlenmiştir (Tokyay, 2003; Newman ve Choo, 2003).

Alkali-silika reaksiyonu, alkali agrega reaksiyonunun en çok bilinen formu olup, bazı agregalarda bulunan silisli mineraller ile çimentodaki alkaliler arasında

gerçekleşen reaksiyonların bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu reaksiyon, zararlı hacim genleşmelerine ve betonun bozulmasına neden olan su emici kalsiyum silika jellerini meydana getirir. Bu zararlı hacim genleşmelerini azaltmanın en etkili yollarından birisi, betonda yüksek fırın cürufu katkısının kullanılmasıdır (Newman ve Choo, 2003).

Beton üretiminde yüksek fırın cürufunun kullanılması, uygun ve yeterli kür uygulanması şartıyla, aşınma dayanıklılığında bir miktar avantaj sağlamaktadır. Ancak, cüruf katkılı betonlar yetersiz kür şartlarından Portland çimentolu betonlara göre daha fazla etkilenmektedirler (Newman ve Choo, 2003).

BÖLÜM DÖRT

KAYNAK ÖZETLERİ

Gündüz and Uğur (2005), pomza agregası ile herhangi bir mineral ve akışkanlaştırıcı katkı kullanmadan taşıyıcı hafif beton üretilebilirliği üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bunun için farklı agrega ve çimento oranlarında karışımlar hazırlamışlardır. Karışımların çökme değerlerinin 35 ile 45 mm arasında değiştiğini, aynı dayanıma sahip normal ağırlıklı betonlardan %30 ile %40 arasında daha hafif olduğunu belirtmektedirler. 450 kg/m³ çimento kullanarak ürettikleri betonun kuru birim ağırlığı 1270 kg/m³ , 28 günlük basınç dayanımı 28 MPa , statik elastisite modülünü 11129 MPa ve çekme dayanımını 6,38 MPa olarak belirlemişlerdir. Çimento miktarının artmasıyla betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde artmaların olduğunu belirtmektedirler. Bu betonların ısı iletim katsayısının 0,455 ile 0,345 W/mK arasında değiştiğini, bu değere göre normal ağırlıklı betonlardan % 50 daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Yazıcıoğlu ve Bozkurt (2006), yapmış oldukları çalışmada çimento olarak CEM I 42,5 N çimento, mineral katkı olarak silis dumanı ve uçucu kül kullanarak taşıyıcı hafif beton üretmişlerdir. Kullanılan silis dumanı (SD) %10 ve uçucu kül (UK) %30 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirilmiştir. Kullanılan katkılarla birlikte hazırlanan 3, 7, 14, 28 ve 90 günlük numunelere basınç, yarmada çekme dayanımı ve ultrasonik test deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre silis dumanı katkılı beton numunelerin her yaşta daha iyi dayanım özellikleri sergilediği görülmüştür. Kontrol betonu olarak hazırlanan numuneler ilk yaşlarda silis dumanı katkılı beton numunelerle benzer özellikler sergilerken uçucu kül katkılı beton serilerinde erken yaşlarda belirgin bir artış gözlenmemiştir. Bununla birlikte UK beton serisi ileri yaşlarda (90 gün) kontrol betonuna daha yakın sonuçlar vermiştir.

Turan (2010), çalışmasında pomza agregası ve değişik oranlarda mineral katkı kullanarak taşıyıcı hafif beton üretimi yapmış ve bu taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülleri gibi bazı mekanik özelliklerini incelemiştir. İlk tasarımında ağırlıkça % 10, % 25 ve % 40 oranlarında uçucu kül ile

çimentoyu yer değiştirirken, ikinci tasarımda ağırlıkça % 25 uçucu kül ile çimentoyu ve % 10 oranında silis dumanı ile ince malzemeyi yer değiştirerek taşıyıcı hafif beton tasarımını yapmıştır. Çalışma sonunda birim hacim ağırlığı ortalama 1839 kg/m^3 olan betonlar elde etmiştir. Mekanik özellikler açısından incelendiğinde en iyi sonucu silis dumanı katkılı ikinci tasarımın verdiğini belirtirken, % 10 ile % 20 arasında uçucu kül kullanımının betonun performansı açısından uygun değerler olduğunu da söylemiştir.

Topçu (1997), yapmış olduğu çalışmada; w/c oranını 0,4 olarak sabit tutup, çimento/ volkanik cüruf oranı 0,15- 0,30- 0,45 ve 0,60 olacak şekilde ve agreganın %50'sini iri agrega olarak volkanik cüruf, diğer %50'sini ince agrega olarak kum, kullanarak üretmiş olduğu yarı hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Sonuç olarak; betonun en önemli özelliklerinden biri olan işlenebilirliğin, cüruf oranı ve tane boyutunun artmasıyla azaldığı ve özellikle 0,45 çimento/cüruf oranından sonra çökme değerinde ani bir düşmenin olduğu ve bu değerden sonra işlenebilirliğin oldukça zorlaştığını belirtmektedir. Aynı zamanda; üretilen betonun bütün özelliklerinde olduğu gibi, ultrasonik ses geçiş hızı ve Schmidt çekici değerlerinde'de volkanik cürufun katılmasıyla bir azalmanın oluştuğunu söylemektedir. Bunun nedenini, volkanik cürufun elastisite modülünün düşük olması ve agrega içerisinde boşlukların bulunması olarak açıklamaktadır. Volkanik cürufun katılmasıyla betonun birim ağırlığı 2400 kg/m^3 'den 1800 kg/m^3 'e kadar düşerken basınç dayanımında $54,5 \text{ MPa}$ 'dan $6,2 \text{ MPa}$ kadar düştüğünü belirtmektedir. Betonların eğilme çekme dayanımları $2,5 \text{ MPa}$ civarında ve yarmada çekme dayanımlarının 2 MPa civarında değiştiğini belirtmektedirler.

Yaşar, Atış, Kılıç ve Gülşen (2003), yapmış oldukları çalışmada su/çimeno oranı 0,55, agrega olarak özgül ağırlığı $2,59 \text{ g/cm}^3$ olan bazaltik pomza ve % 20 oranında uçucu külün çimento ile yer değiştirmesi ile elde ettikleri taşıyıcı hafif betonun basınç dayanımı ve eğilme dayanımını incelemiştir. 500 dozlu kontrol karışimli taze betonun birim hacim ağırlığını 1955 ± 29 ve hava kurusu BHA ise 1860 ± 23 bulurken ; % 20 oranında çimento ile yer değiştiren uçucu küllü taşıyıcı hafif betonun taze BHA 1932 ± 21 iken hava kurusu BHA ise 1850 ± 18 bulmuşlardır. Basınç dayanımı

incelendiğinde ilk günlerde uçucu küllü karışım, kontrol karışımından düşük sonuçlar verirken 28. günde küllü karışım 29 MPa iken kontrol karışımı 28 MPa değer vermiştir. İleriki yaşlarda küllü beton arayışını giderek açmıştır. Eğilme dayanımları incelendiğinde ise 3. günde kontrol karışımı kül katkılı betona göre daha yüksek sonuç verirken 7. günde küllü beton kontrole yetişmekte ve çok az miktarda kontrolü geçmekte ve 28. günde ise kül katkılı beton 6.8 MPa iken kontrol karışımı 6.7 MPa olarak ölçülmektedir.

Sümer (1994), çalışmasında F tipi uçucu küllü ve uçucu külsüz beton numuneler üretmiştir. Bu numunelerin 2, 7 ve 28. gün ile 3 ay ve 6 aylık basınç dayanımları, 3 ve 6 aylık kılcal geçirimsizlik katsayıları ölçülmüştür. Çimento yerine, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında uçucu kül ilave edilmiştir. Araştırma bulguları, uçucu külün betonun kısa süreli dayanımlarını olumsuz etkilediğini, ancak düşük oranlarda uçucu kül kullanılan betonlarda uzun süreli dayanımlarının şahit betona göre arttığı görülmüştür. Ayrıca, uçucu kül katılan betonlarda, kılcal su geçirimsizliğinin azaldığı saptanmıştır.

Yun, Ratiyah, ve Basheer (2004), laytag (bir agrega türü), yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliği üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında Çimento+ Kum+Çakıl , Çimento+ Laytag+ Yüksek fırın cürufu ve %70 çimento+ %30 uçucu kül+ Laytag karışımları kullanılmıştır. Sonuç olarak; birim hacim ağırlığı 1560- 1960 kg/m³ ve basınç dayanımı 20-40 MPa arasında değişen hafif beton üretiminin mümkün olduğunu, çimentonun bir kısmının yerine uçucu külün kullanılmasının basınç dayanımı ve su geçirgenliğinde düşüğe neden olduğunu belirtmişlerdir. Cüruf ve laytag kullanılması betonun porozitesinde artmaya, uçucu külün kullanılması ise porozitede bir azalmaya neden olduğunu belirtmektedirler. Çekme dayanımı bakımından uçucu kül, cüruf ve laytag orta sınıf betonlarda olumlu etki oluştururken, yüksek dayanımlı betonlarda tam tersi bir etki oluşturduğunu söylemektedirler.

Demir (2009), çalışmasında çimento yerine aynı oranlarda silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK) ikameli betonun basınç ve yarmada – çekme dayanımlarına etkisi

araştırmıştır. CEM I 42,5 sınıfı çimento kullandığı çalışmada, puzolanik katkı olarak %5,10,15,20 ve 25 oranlarında SD ve UK çimento ile ağırlıkça yer değiştirmiştir. Hazırladığı 7, 28 ve 90 günlük beton örneklerine basınç ve yarmada çekme deneyleri uygulamıştır. Elde ettiği sonuçlara göre SD katkılı betonların her yaşta referans ve UK ikameli betonlara göre daha iyi basınç ve yarmada çekme dayanıma sahip oldukları görülmüştür. En iyi basınç ve yarmada çekme dayanımını ise her yaşta %20 SD ikameli betonlardan elde edilmiştir.

Taşdemir (1982), taşıyıcı hafif agregalı betonların elastik ve elastik olmayan davranışlarını incelemiştir. Bu incelemeye göre, 1 m³ beton içinde mutlak hacmi aynı kalmak koşuluyla agrega granülometrisinin hangi bölümü hafif agrega ile değiştirilirse değiştirilsin elastisite modülü ve poisson oranının değişmediğini, geleneksel betonun hafif agrega kullanılmak suretiyle hafifletilmesi halinde, poisson oranında azalmanın az, buna karşılık elastisite modülündeki azalmanın fazla olduğunu belirtmiştir. Yarı hafif beton üretiminde, agregaların ince kısmının geleneksel agregalarla değiştirilmesinin şekil değiştirme ve basınç dayanımı yönünden daha uygun olacağını ifade etmiştir.

Chi, Huang, Yang ve Chang (2003) , gerçekleştirdikleri çalışmada agrega özelliklerinin hafif betonların dayanımı, rijitliği ve elastisite modülleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Üç farklı tip agrega, değişik uçucu kül oranlarında beton yapımında kullanılmıştır. Deneysel verileri istatistikî olarak değerlendirmiş, sonuç olarak agrega özelliklerinin ve su/çimento oranının basınç dayanımını ve elastisite modülünü önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir.

Chen ve Liu (2005), yaptıkları çalışmada karbon, çelik ve polipropilen tipi üç farklı lifin hafif betonların işlenebilirlik, mekanik ve rötre özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Hafif agrega olarak kuru birim kütlesi 1460 kg/m³ olan genleştirilmiş kil kullanılan çalışmanın sonunda, liflerin karışımı bir ağ gibi örerak ve birim kütlesi düşük olan agregaların segregasyonunu sınırladığını, su kasma ve çökelmeyi azalttığını, aynı zamanda karışımın homojenliğini artırdığını gözlemlemişlerdir. Bunun yanında çökme miktarında azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir. Karbon

ve çelik liflerin her ikisinin de farklı miktarda basınç ve yarma dayanımını artırdıklarına, polipropilen tipi lifin kullanılması durumunda ise basınç dayanımında bir miktar azalma olduğuna, özellikle karbon ve çelik liflerin rötöre miktarını etkili bir şekilde azalttığına dikkat çekmişlerdir.

Al-Khaiat ve Haque (1998), sıcak, kuru ve tuzlu saklama koşullarına maruz kalan yüksek performanslı taşıyıcı hafif betonların basınç dayanımı üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmalarında Lytag adıyla bilinen kayaktan üretilen iri ve ince agregaları kullanılarak birim kütlesi 1800 kg/m^3 ve basınç dayanımı 50 MPa olan taşıyıcı hafif beton üretilmiştir. Sonuç olarak, ilk ayın sonunda, hafif betonların basınç dayanımlarının başlangıç küründen geleneksel betonlara oranla daha az etkilendiğini belirtmişler ve bu durumu hafif agregaların gözeneklerinde hapsedilen suyun betonun bakımına (kürüne) katkı yapmasıyla açıklamışlardır. Bununla birlikte, daha uzun sürelerde, saklama koşullarının hafif betonun basınç dayanımını geleneksel betonlarınkine benzer şekilde etkilediğini gözlemişlerdir.

Kayali, Haque ve Zhu (2003), yaptıkları çalışmada, agrega olarak topaklaştırılmış uçucu kül kullanarak ürettikleri yüksek performanslı hafif betonların mekanik özellikleri üzerine, polipropilen ve çelik liflerin etkisini incelemiştir. Katkısız hafif betona göre beton hacminin %0,56 oranında polipropilen katkısı kullanılan betonların kesme dayanımlarında %90, kopma modülünde ise %20 artışa sebep olduğu, bunun yanında diğer mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Beton hacminin %1,7 si oranında kullanılan çelik lifli betonların ise kesme dayanımlarında %118 kayma modüllerinde de %80 artış olduğunu belirtmişlerdir. Çelik lifler ayrıca elastisite modülünü bir miktar düşürmüş ve gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin daha yatık bir hal almasına neden olmuştur. Kullanılan liflerin sünekliği artırdığı da varılan sonuçlar arasındadır.

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1 Amaç

Bu çalışmada, İzmir Menderes yöresi pomza agregası ve değişik tipte mineral katkı malzemesi kullanılarak, birim hacim ağırlığı düşük, basınç dayanımı minimum 20 MPa olan taşıyıcı hafif beton üretimi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda elde edilen hafif betonların değişik yaş ve kür koşullarında mekanik özellikleri incelenmiştir.

5.2 Kapsam

Kapsam olarak; ağırlıkça silis dumanının %10, uçucu külün %20 ve yüksek fırın cürufunun %20 oranlarında çimento ile yerdeğiştirmesi ile taşıyıcı hafif betonlar üretilmiştir. Üretilen bu betonlar 7, 28 ve 56 günlük su kürüne tabi tutulmuştur. Su kürü sonrası numunelerin yarısı kuru yüzey doygun halde, diğeri yarıda sıcaklığı 105°C' ye ayarlanmış etüvde 24 saat kurumaya bırakıldıktan sonra teste tabi tutulmuştur. Buhar kürü için ise diğeri başka dökümler yapılmıştır. Mekanik deneylerden basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı tespiti için 100x200 mm boyutlarında silindir numunelerden faydalanılırken, eğilmede çekme dayanımı tespiti için ise 75x75x300 mm ayrıtlarında prizmalardan faydalanılmıştır. Bu prizmaların ikiye ayrılan parçalarının altına ve üstüne 75x75 mm ayrıtlı plakalar konularak basınç deneyine tabi tutulmuştur. Elastisite modülü tayini için ise yine 100x200 mm'lik numunelerden yararlanılmıştır.

Taze ve sertleşmiş haldeki taşıyıcı hafif betonlara uygulanan deneyler Tablo 5.1' de verilmiştir.

Tablo 5.1 Taze ve sertleşmiş beton deneyleri

Taze Beton Deneyleri	Sertleşmiş Beton Deneyleri
✓ Çökme (slump) deneyi	✓ Basınç dayanımı deneyi
✓ Birim hacim ağırlık (BHA)	✓ Elastisite modülü deneyi
✓ Beton sıcaklığı	✓ Eğilmede çekme deneyi
	✓ Yarmada çekme deneyi
	✓ Kuru birim hacim ağırlık

Yapılan deney çeşitlerine göre kullanılan numune tipleri, boyutları, serideki numune sayısı ve toplam numune sayısı ise Tablo 5.2' de özetlenmiştir.

Tablo 5.2 Sertleşmiş beton deneylerinde kullanılan numune tipi ve sayısı

Deney Türü	Numune boyutları	Serideki numune sayısı	Toplam numune sayısı
Basınç Dayanımı & Elastisite modülü (silindir)	φ100mm h=200mm silindir örnekler	6	63
Basınç Dayanımı (küp)	75 mm ayrıtlı küp	12	126
Eğilmede deneyi	75*75*300 mm prizma	6	63
Yarmada çekme deneyi	φ100mm h=200mm silindir örnekler	6	63

5.3 Kullanılan Malzemeler

Bu kısımda, deneylerde kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, malzemelerin miktarları, deneysel yöntemler ve deneysel çalışmalardan bahsedilmiştir.

5.3.1 Pomza Agregası

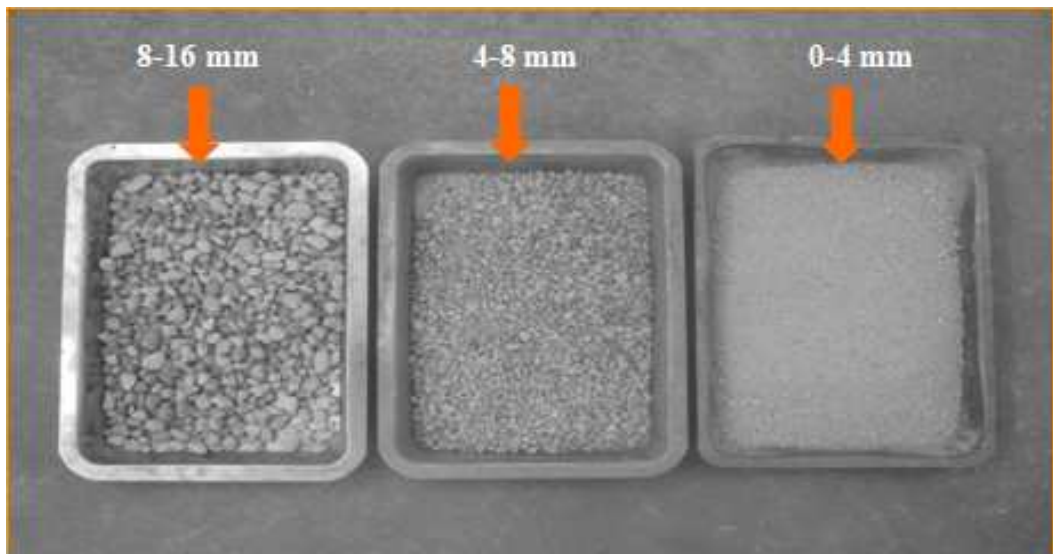
Çalışmada hafif agrega olarak İzmir-Menderes yöresine ait Pomza Export Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilen pomza agregası kullanılmıştır.

Şekil 5.1' de görüldüğü gibi pomza agregaları yığınların temiz bölgesinden alındıktan sonra çuvallara doldurularak Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarına getirilerek depolanmıştır.



Şekil 5.1 Menderes yöresi pomza agregası

Çalışmada 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm tane büyüklüğüne sahip pomza agregaları kullanılmıştır (Şekil 5.2). En büyük agrega tane çapı 16 mm'dir.

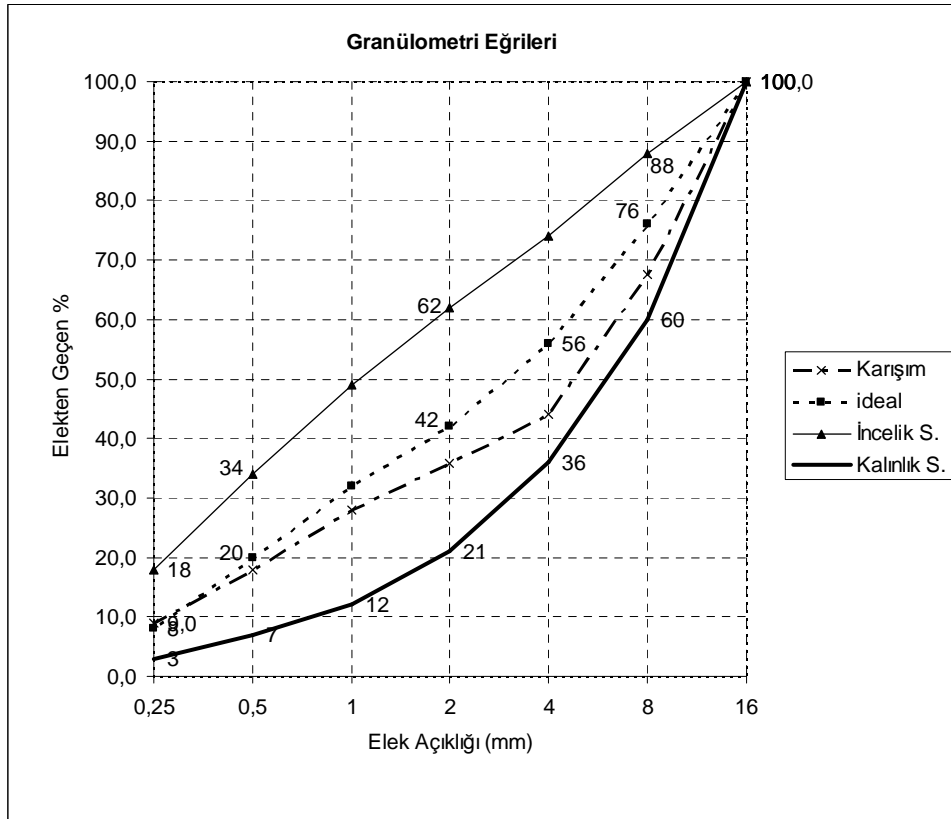


Şekil 5.2 Üç farklı boyuttaki hafif agregalar

Agregaların elek analizi deneyi yapılmış olup, elekten geçen malzemelerin yüzdesi Tablo 5.3' te ve tane boyut dağılımı ise Şekil 5.3' te verilmiştir.

Tablo 5.3 Elek analizi sonuçları

Elek açıklığı (mm)	Elekten Geçen %		
	8-16	4-8	0-4
16	100	100	100
8	20	98	100
4	0	47	100
2	0	29	91
1	0	22	71
0,5	0	18	42
0,25	0	9	21



Şekil 5.3 Agregata tane boyut dağılımı

İri, orta ve ince agregaların yoğunluk tayini ve su emme oranı TS EN 1097-6' ya uygun olarak, gevşek-sıkışık yoğunluk tayini ise TS EN 1097-3' e uygun olarak yapılmıştır. Deneyle sonuç elde edilen değerler Tablo 5.4' te verilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları ise firmadan alınmıştır (Tablo 5.5). Kullanılan pomza agregasının kimyasal bileşimi Tablo 5.5' te verilmiştir.

Tablo 5.4 Pomza agregasının fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellik	Agrega Boyutu (mm)		
	0-4	4-8	8-16
Kuru özgül ağırlık	1,89	1,74	1,42
K.Y.D özgül ağırlık	2,30	2,05	1,60
Su emme (%)	18	15	11
Gevşek BHA (kg/l)	1,13	1,12	1,05
Sıkışık BHA(kg/l)	1,34	1,28	1,17
Kullanım oranı %	30	30	40

Tablo 5.5 Pomza agregasının kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim	(%)
SiO ₂	72,63
Al ₂ O ₃	12,14
Fe ₂ O ₃	0,99
MgO	0,01
CaO	0,27
Na ₂ O	1,62
K ₂ O	5,99
MnO	0,07
P ₂ O ₅	0,003
TiO ₂	0,03
PF	1,94
Çözünmeyen Kalıntı	0,23

5.3.2 Çimento

Çalışmada, TS EN 197-1 standardına uygun olan CEM I 42.5/R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimento, Çimentaş İzmir Çimento Fabrikası Türk A.Ş' den temin edilmiş olup fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Tablo 5.6' da verilmiştir.

Tablo 5.6 CEM-I 42,5 R çimentosunun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal Bileşim	CEM-I (%)	CEM I Basınç Dayanımı (MPa)	
CaO	64,25	2 günlük	30,7
SiO ₂	18,52	7 günlük	43,0
Al ₂ O ₃	4,70	28 günlük	50,9
Fe ₂ O ₃	3,24	CEM I Fiziksel Öz.	
MgO	0,93	Özgül yüzey (cm ² /g)	3860
Na ₂ O	0,35	Özgül ağırlık	3,15
K ₂ O	0,80	Litre Ağırlığı (g/l)	965
SO ₃	3,03		
Cl	0,006		
Kızd. Kay.	3,17		
Serbest CaO	1,94		
Çözünmeyen Kalıntı	0,23		

5.3.3 Mineral Katkılar

Çalışmada mineral katkı olarak silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Bu puzolanları sırasıyla inceleyecek olursak ;

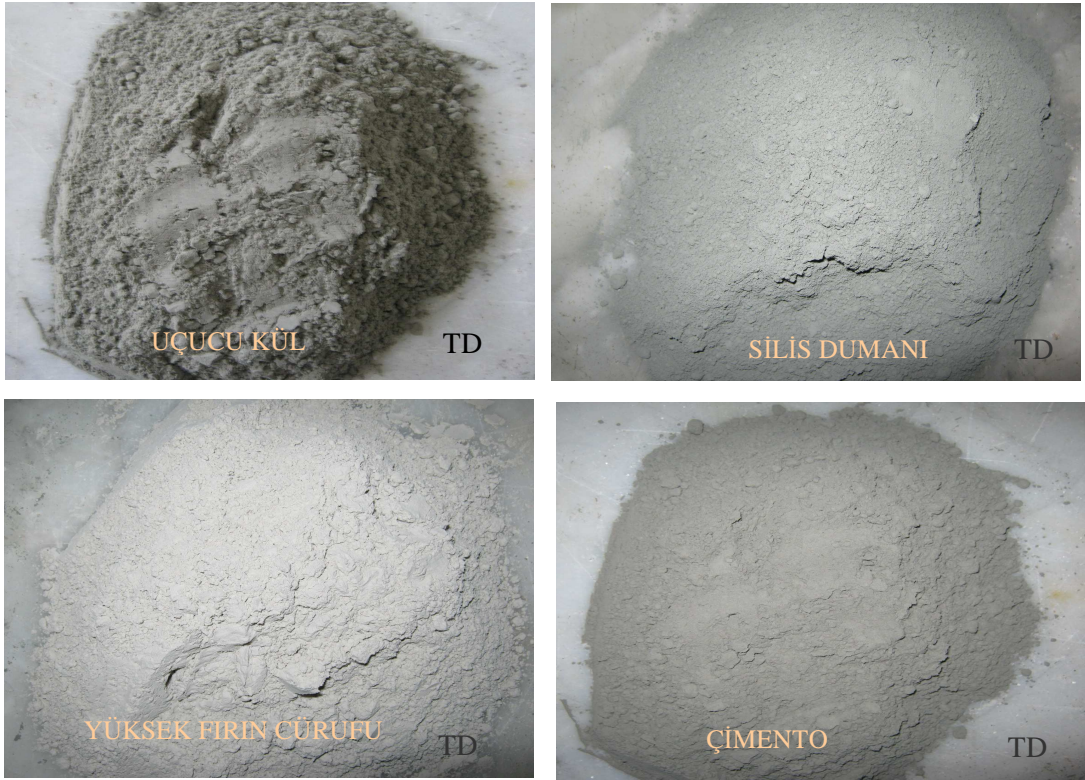
Uçucu Kül, Çimbeton A.Ş tarafından temin edilmiş olup Tunçbilek Termik Santralinden çıkan uçucu küldür (Şekil 5.4). ASTM C618 (1998) standardına göre SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ değerinin %70'nin üzerinde olması ve CaO miktarının %10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir. Çimentonun ağırlıkça % 20'si oranında yer değiştirilerek kullanılan külün analiz sonuçları Tablo 5.7' de verilmiştir.

Yüksek Fırın Cürufu, Akçansa Çimento San.T.A.Ş.-İzmir firması tarafından temin edilmiştir (Şekil 5.4). Çimentonun ağırlıkça % 20'si oranında yer değiştirilerek kullanılan cürufun analiz sonuçları Tablo 5.7' de verilmiştir.

Silis Dumanı, Denizli Çimento A.Ş tarafından temin edilmiştir (Şekil 5.4). Çimentonun ağırlıkça % 10'u oranında yer değiştirilerek kullanılan silis dumanının analiz sonuçları Tablo 5.7' de verilmiştir.

Tablo 5.7 Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşim (%)	SD	UK	YFC	Fiziksel Özellikler	
CaO	0,51	9,35	36,25	SD Fiziksel Öz.	
SiO ₂	92,25	51,75	40,55	Özgül yüzey (cm ² /g)	210800
Al ₂ O ₃	0,88	17,66	12,20	Özgül ağırlık	2,30
Fe ₂ O ₃	1,98	9,24	1,20	YFC Fiziksel Öz.	
MgO	0,96	5,49	6,95	Özgül yüzey (cm ² /g)	4956
Cr ₂ O ₃	-	-	-	Özgül ağırlık	2,91
Na ₂ O	0,45	0,53	0,00	UK Fiziksel Öz.	
K ₂ O	0,12	1,21	0,00	Özgül yüzey (cm ² /g)	3160
SO ₃	0,33	2,22	-	Özgül ağırlık	2,22
Cl	-		-		
C	-		-		
S	-		-		
Kızd. Kay.	3,0	0,58	-		
Serbest CaO	-	3,48	-		
(Ca+Mg)/Si	-		1,07		
Ca+Mg+Si	-		83,75		



Şekil 5.4. Çimento, Uçucu kül, Silis dumanı ve Yüksek fırın cürufu

5.3.4 Kimyasal Katkı

Çalışmada kimyasal katkı olarak, Chryso Kat Türkiye- Katkı Malzemeleri San. ve Tic. A.Ş. firmasının üretimi olan Chryso Fluid Ağı Süper Akışkanlaştırıcı katkısı kullanılmıştır. Polinaftalen bazlı sentetik polimer esaslı bu katkının yoğunluğu $1,22 \text{ gr/cm}^3$, pH değeri 6, rengi kahverengidir. Karışımlarda $15 \pm 1 \text{ cm}$ çökme hedeflenerek farklı dozajlarda kullanılmıştır.

5.3.5 Karma Suyu

Çalışma boyunca bütün karışımlarda içilebilir nitelikte çeşme suyu kullanılmıştır.

5.4 Karışımların Hazırlanması

5.4.1 Puzolanik Aktivite Karışımı

Çalışmada kullanmış olduğumuz puzolanların performansını görmek için puzolanik aktivite deneyi, ASTM standardı referans alınarak yapılmıştır. Silis dumanı için ASTM C 1240, uçucu kül için ASTM C 311 ve yüksek fırın cürufu için ise ASTM C 989 standardından faydalanılmıştır. Bu standartlar ışığında Tablo 5.8’ de karışım oranları verilmiştir. Şekil 5.5’ de ise deneyde kullanılan kum, çimento ve puzolanlar verilmiştir. Deney esnasında Şekil 5.6’ da görüldüğü gibi kontrol numunesi yayılma çapı ölçülmüş ve buna göre diğer dökümler yapılmıştır.

Tablo 5.8 Puzolanik aktivite karışım oranları

Malzemeler	Karışımlar			
	K	SD	UK	YFC
Standart kum (0-4 mm) (g)	1375	1375	1375	1375
Çimento (g)	500	450	400	250
Silis Dumanı (g)	-	50	-	-
Uçucu kül (g)	-	-	100	-
Yüksek F.C. (g)	-	-	-	250
Su (ml)	242	260	242	250
Yayılma çapı (mm)	135	~135	~135	~135

* K : Kontrol, * SD : Silis Dumanı, * UK : Uçucu Kül, * YFC : Yüksek Fırın Cürufu



Şekil 5.5 Puzolanlar, çimento ve kum



Şekil 5.6 Yayılma çapı ölçümü

5.4.2 Hafif Beton Karışımı

Bu tez çalışmasında ilk olarak, amaç ve kapsam kısmında da belirtildiği gibi birim hacim ağırlığı 2000 kg/m^3 'ün altında ve minimum basınç dayanımı 20 MPa olan hafif beton üretimi hedeflenmiştir. 1m^3 hafif betonda kullanılacak malzeme bileşenlerini bulabilmek amacıyla birçok ön deney yapılmış (deneme-yanılma yöntemiyle) ve malzeme miktarları belirlenmiştir. Yapılmış olan bir tasarımda pomza agregası yerine ağırlıkça % 15-20 oranında kum ve çakıl ayrı ayrı kullanılmıştır. 28 gün su kürüne tabi tutulan bu numuneler deneye tabi tutulduğunda basınç dayanımında 1-2 MPa gibi tatminkar olmayan bir artış olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, kullanılan normal agregaların özgül ağırlıklarının yüksek oluşu betonun birim hacim ağırlığının yükselmesine sebep olmuştur ki, çalışma kapsamında bu istenilmeyen bir durumdur. Diğer taraftan hiçbir puzolan ikamesi olmayan hafif beton numunelerinin ise 28. gün sonunda 15 MPa'da kaldığı ve taşıyıcı hafif beton özelliği göstermediği görülmüştür. Bütün bu veriler ışığında zayıf agreganın yanına güçlü bir matris oluşturmak amacıyla bütün numunelere silis dumanı takviyesi ön görülmüştür ve Tablo 5.9' daki hafif beton karışımı tasarlanmıştır.

Tablo 5.9 Hafif beton karışım miktarları

Bileşenler		Karışımlar		
		HB	HB-U	HB-Y
Çimento	(kg/m^3)	450	350	350
Silis Dumanı	(kg/m^3)	50	50	50
Uçucu Kül	(kg/m^3)	-	100	-
Yüksek F.C	(kg/m^3)	-	-	100
Su	(kg/m^3)	175	175	175
0-4	(kg/m^3)	444	435	443
4-8	(kg/m^3)	396	387	396
8-16	(kg/m^3)	413	403	411
Akışkanlaştırıcı	(kg/m^3)	4,5	4,0	5,5
S/B oranı	-	0,35	0,35	0,35
Teorik b.h.a	(kg/m^3)	1928	1900	1925

*HB : Silis dumanlı, *HB-U : Silis dumanı+Uçucu kül, *HB-Y: Silis dumanı+Yüksek fırın cürufu

5.5 Taze ve Sertleşmiş Beton Deneyleri

Bu bölümde, taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılırken, kullanılan malzemeler, makinalar ve deney yöntemlerinden bahsedilecektir.

5.5.1 Taze beton

Beton karışımı için kullanılacak agrega, çimento, puzolan, kimyasal katkı ve su 1 g hasssiyetli terazide tartılmıştır. Beton karışımında 150 dm³ lük yatay eksenli mikser kullanılmıştır (Şekil 5.7). Hazırlanan malzemelerden (0-4, 4-8, 8-16) mm boyutlarında agregalar mikser boşaltıldıktan sonra toz malzeme boşaltılmış ve homojen bir harman elde edilene kadar mikser çalıştırılmıştır. Daha sonra mikser çalışır halde su ve kimyasal katkı ilave edilerek 2 dk daha karıştırılmıştır. Bütün karışımlarda bu süre sabit tutulmuştur. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra mikserden bir miktar taze beton alınarak çökme deneyi yapılmıştır. İstenen kıvama ulaşıldıktan sonra beton geniş bir tepsiye boşaltılıp taze hal birim hacim ağırlığı, beton sıcaklığı gibi deneyler yapılmıştır. Bu işlemlerden sonra zaman kaybetmeden taze beton kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 5.8). Bu işlem sırasında agregaların parçalanmaması için gereken hassasiyet gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Mikser



Şekil 5.8 Kalıpların doldurulması

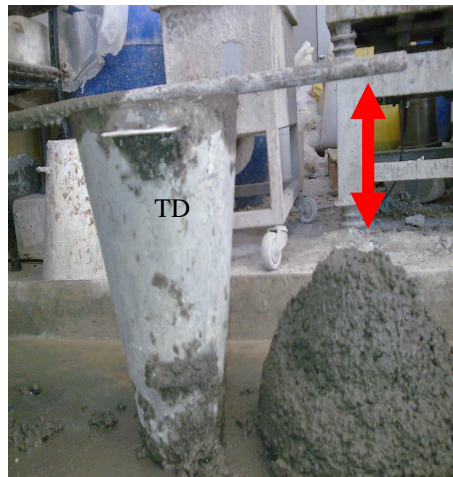
5.5.2 Taze Beton Deneyleri

5.5.2.1 Çökme (Slump) Deneyi

Taze betonun işlenebilirliğinin saptanması amacıyla TS EN 12350-2'ye uygun olarak çökme hunisi metodu ile kıvam deneyi yapılmıştır. TS EN 12350-2'ye göre taze beton kalıba eşit kalınlıkta üç tabaka halinde ve her tabakanın sıkıştırılmış durumdaki kalınlığı, kalıp yüksekliğinin yaklaşık olarak 1/3'ü olacak şekilde doldurulur. Doldurma esnasında her tabaka, sıkıştırma çubuğu ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılır. Bu tanıma uygun olarak huninin doldurma işlemi gerçekleştirildi, ancak şişleme işlemi hafif agregaların kırılma hasssiyetinden dolayı daha yavaş gerçekleştirildi (Şekil 5.9). Huni doldurulduktan sonra zaman kaybetmeden yukarı kaldırılarak çökme değeri ölçüldü (Şekil 5.10).



Şekil 5.9 Huninin doldurulması



Şekil 5.10 Çökmenin ölçülmesi

5.5.2.2 Taze Beton Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Taze hal birim hacim ağırlık deneyi silindirik kap içerisine karışım işlemi yeni bitmiş betondan homojen biçimde alınan betonun şekilde görülen silindirik kaba iki kademedede doldurulması ve daralı biçimde tartılmasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 Birim hacim ağırlık tespiti

5.5.3 Sertleşmiş Beton Deneyleri

7, 28 ve 56 günlük yaşlar için basınç dayanımı, eğilmede çekme, yarmada çekme ve elastisite modülü deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde kullanılan yöntemler ve makinalar aşağıda özetlenmiştir.

5.5.3.1 Basınç Dayanımı Tayini

Sertleşmiş beton numunelerin belirli yaşlardaki basınç dayanımları TS EN 12390-3'a uygun olarak yapılmıştır. Basınç deneyleri, 300 ton kapasiteli ELE markalı bir hidrolik presle gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.12). Numune olarak 100*200 mm boyutlarında silindirik numune ve 75 mm ayrıtlı küp numuneler kullanılmıştır (Şekil 5.14 ve Şekil 5.15). Silindir örnekler basınç dayanımına tabi tutulmadan önce basınç yükünün numuneye üniform bir şekilde dağılması için başlıklama da kükürt kullanılmıştır (Şekil 5.13). Numuneler başlıklandıktan sonra deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.12 Pres



Şekil 5.13 Başlıklanan Numuneler



Şekil 5.14 Silindir numune



Şekil 5.15 Prizma numune

Basınç dayanımı her bir deney için kırılan üç numunenin aritmetik ortalama yükü alınarak aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmıştır.

$$f_c = F/A_c \quad (5.1)$$

Formülde;

f_c = Basınç dayanımı, MPa (N/mm^2),

F = Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

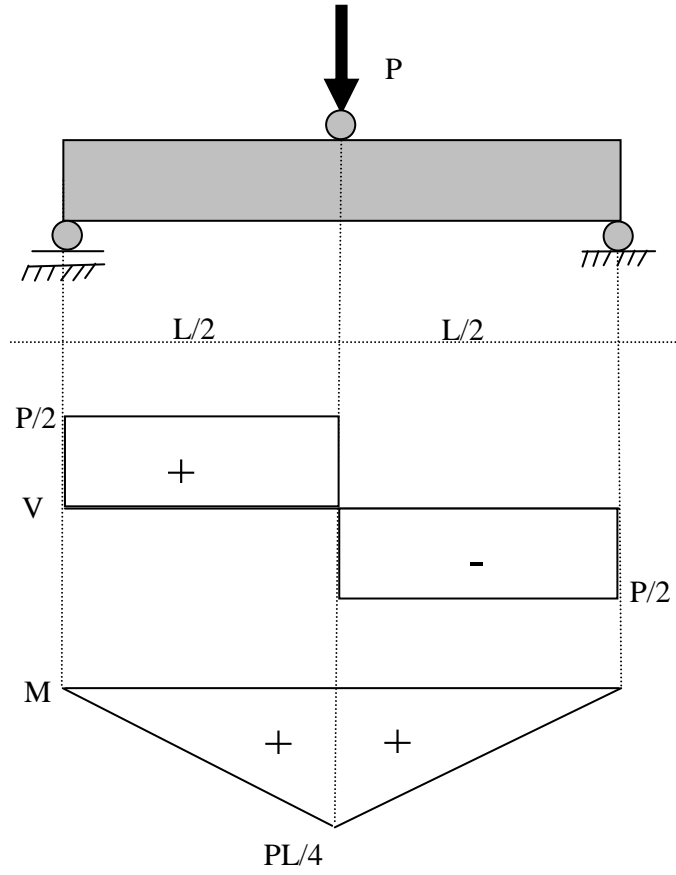
A_c = Numunun üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alan, mm^2

dir.

5.5.3.2 Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini

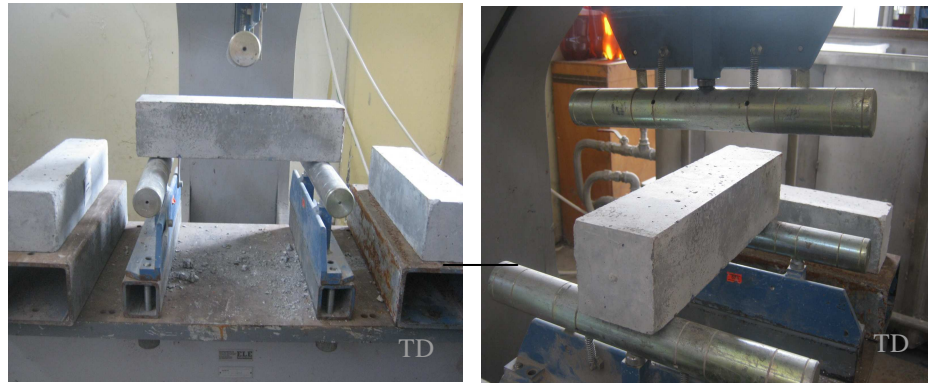
Betonun çekme dayanımı tespiti yöntemlerinden biri de eğilme dayanımından çekme dayanımının tahmin edilmesidir. Eğilme deneyi, numunelerin belirli

yaşlardaki dayanımları TS EN 12390-5'e uygun olarak Şekil 5.16' da gösterildiği gibi üç noktadan, ortasına tekil yük uygulanarak deneye tabi tutulmaktadır.



Şekil 5.16 Eğilme deneyi (teorik gösterim)

Eğilme deneyi için 75*75*300 mm'lik prizmalar kullanıldı. Bu prizmalar Şekil 5.17' de görüldüğü gibi mesnet üzerine düzgün bir şekilde yerleştirilerek laboratuvar ortamında deneye tabi tutuldu.



Şekil 5.17 Eğilme deneyi (Uygulamalı gösterim)

Eğilme deneyi sonuçları aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplandı.

$$f_{ct} = \frac{3.F.L}{2d_1d_2^2} \quad (5.2)$$

f_{ct} = Eğilme dayanımı, MPa (N/mm^2),

F = En büyük yük, N,

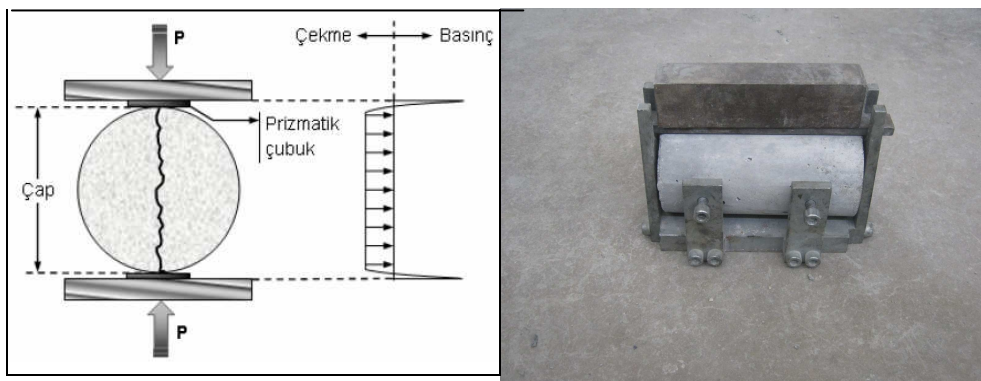
L = Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık, mm

$d_1 d_2$ = Numunenin en kesit boyutları, mm,

dir.

5.5.3.3 Yarmada Çekme Dayanımı Tayini

Silindir yarma deneyi numunelerinin belirli yaşlardaki dayanımları TS EN 12390-6'ya uygun olarak yapılmıştır. Deneyde 100x200 mm boyutlarında silindir numuneler kullanılmıştır. Numuneler Şekil. 18' de görüldüğü gibi aparata yerleştirildikten sonra, yükün üniform yayılması için üst temas yüzeyi boyunca demir bir çubuk yerleştirilmiştir. Silindir yarma deneyleri 300 ton kapasiteli hidrolik presle gerçekleştirilmiştir. Silindir yarma deneyinin şematik gösterimi ve numune ile deney aparatı Şekil 5.18' de verilmiştir.



Şekil 5.18 Silindir yarma deneyi yapılışı (çizim ve fotoğraf)

Silindir yarma dayanımı için kırılan üç numunenin aritmetik ortalama yükü alınarak aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmıştır.

$$F_{ct} = \frac{2 * F}{\Pi * L * D} \quad (5.3)$$

F_{ct} = Yarmada çekme dayanımı, MPa (N/mm^2),

F = En büyük yük, N,

L = Numunenin temas çizgisi uzunluğu, mm,

D = Numunenin çapı, mm.

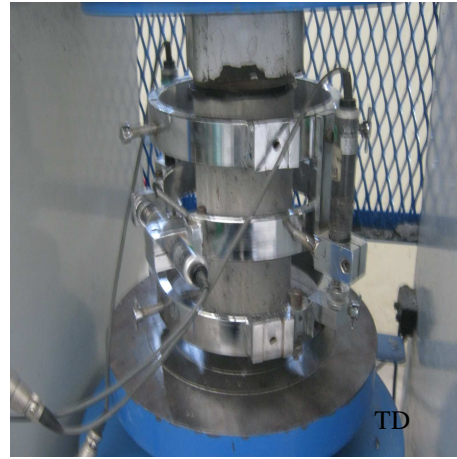
şeklinde hesaplanır.

5.5.3.4 Elastisite Modülü Tayini

Deneylerde U-TEST marka, yük ve deplasman kontrollü, 200 ton kapasiteli hidrolik beton basınç presi kullanılmıştır. Deneyler sırasında 2 adet LVDT'nin bağlandığı ve numunenin içine oturtularak vidalarla tutturulduğu yükleme çerçevesi kullanılmıştır. Her deney öncesi numune Şekil 5.19' da gösterildiği gibi çerçeve içine oturtularak gerekli ayarlama yapılmış ve Şekil 5.20' de görüldüğü gibi tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Gerilme-birim deformasyon grafikleri elde edilmiş, bu değerler excel ortamında işlenerek elastisite modülü belirlenmiştir.



Şekil 5.19 Numunenin hazırlanması



Şekil 5.20 Elastisite modülü deneyi

5.5.3.5 Buhar Kürü Uygulaması

Taze beton, 100*200 mm'lik silindirik ve 75*75*300 mm'lik prizmatik kalıplara yerleştirilip, gerekli sıkıştırma işlemleri yapıldıktan sonra buhar kürü tankına koyularak "3" saat ön bekleme süresince laboratuvar şartlarında saklanmıştır (Şekil 5.21).



Şekil 5.21 Buhar kürü tankı

Isıl işleme başlanmadan önce buhar tankı içi sıcaklık ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Buhar kürü görece örnekler kabine yerleştirildikten sonra manuel olarak ayarlanan derece ayarlaması yapılmıştır. Buhar kürü uygulanacak örnekler 80°C işlem sıcaklığına 20±1°C/saat ısıtma hızı uygulanarak getirilip, bu sıcaklıklardan 11±1°C soğutma hızı kullanılarak soğutulduktan sonra uygun sıcaklıklarda kırılmıştır. Çıkarılan örnekler yaklaşık 60 dk. içinde kalıplarından sökülerek preste kırılmıştır.

BÖLÜM ALTI

DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde, taze ve sertleşmiş haldeki taşıyıcı hafif beton sonuçları izah edilmiştir.

6.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Taze halde beton performansını görmek için yapmış olduğumuz ön deneylerde, akışkanlaştırıcı katkı kullanmadan hafif beton dökümü yapılmıştır. Dökülen taze beton, çökme deneyine tabi tutulduğunda “sıfır” çökme değeri verdiği gözlemlenmiştir. Oysa aynı su/bağlayıcı oranına sahip normal betonda , yerçekimi etkisi altında taze haldeki betonun kendi ağırlığı ile bir miktar çöktüğü bilinmektedir. Yaptığımız diğer başka bir deneyde akışkanlaştırıcı katkı miktarı normal değerinden biraz fazla artırıldığında betonun tablaya yayıldığı ve kaba malzemenin ince malzemeden tamamen ayrıldığı gözlemlenmiştir. Yapılan ön deneyler neticesinde çökme değeri 15 ± 1 cm hedeflenerek karışımlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanımına gidilmiştir. Çökme deneyi akabinde, silindirik bir kap yardımı ile taze beton birim hacim ağırlık tespiti yapılmıştır. Beton sıcaklık ölçümü için ise betonun içine gömülebilen ucu olan, dijital bir termometreden yararlanılmıştır. Tablo 6.1’ de üretilen hafif betonların taze hal birim hacim ağırlık deney sonuçları, çökme değerleri, beton dökümü esnasında ve dökülen betonun beton sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 6.1 Taze beton deney sonuçları

	BHA (kg/m³)	Çökme (cm)	Hava Sıcaklığı (°C)	Beton Sıcaklığı (°C)
HB	1955	15±1	15	15,5
HB-U	1918	15±1	16	16
HB-Y	1927	15±1	13	13,5

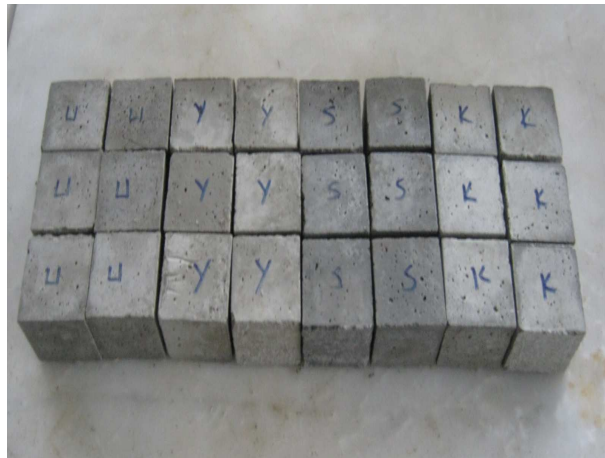
İşlenebilirlik açısından en iyi performansı uçucu kül katkıli HB-U betonu sergilemiştir. Uçucu külün yoğunluğu portland çimentosunun yoğunluğundan daha azdır. Bu nedenle, uçucu kül içeren beton karışımında çimentonun bir bölümünün yerine eşit ağırlıkta uçucu kül kullanıldığında, betondaki bağlayıcı hamurunun hacmi artmaktadır. Daha büyük hacme sahip bağlayıcı hamur, taze betondaki agrega tanelerinin arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır. Ayrıca uçucu kül taneleri küresel şekillidir. Küresel şekilli tanecikler iç sürtünmeyi azaltmakta, bilyeli yatak tesiriyle betonun akıcılığını artırmaktadır (Erdoğan, 2003 ve Atış, 1997).

Diğer taraftan, silis dumanının çok ince olması ve terlemeyi azaltmasından dolayı perdah işlemleri sırasında, sadece silis dumanı katkıli HB betonu, diğer % 20 uçucu kül ve % 20 yüksek fırın cürufu katkıli betonlara kıyasla daha fazla zorluk çıkarmıştır.

6.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

6.2.1 Puzolanik Aktivite Deney Sonuçları

Şekil 6.1' de görülen 50 mm ayrıtlı küp numuneler, 21°C sıcaklığa ayarlanmış rezistanslı kür tankında 7 ve 28 gün bekletildikten sonra basınç deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 6.1 Küp numuneler

- **Yüksek Fırın Cürufu Aktivite İndeksi**

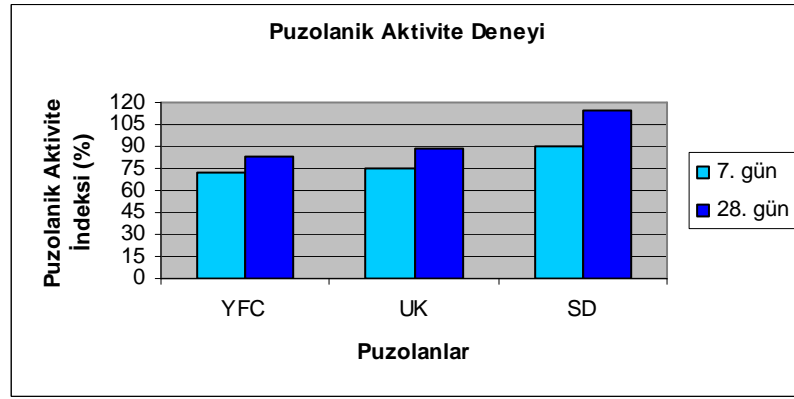
ASTM C 989' e uygun olarak 50 mm'lik küpler ile yapılan cürufu - çimentolu harçlara ait ortalama basınç mukavemetleri her bir yaş için üç değer ortalama alınarak, 7. günde 29 MPa, 28. günde ise 40 MPa olarak bulunmuştur. Referans çimentosu ile hazırlanmış harç küplerinin ortalama basınç mukavemetleri 7. günde 40 MPa, 28. günde ise 48 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 6.2). Aktivite indeksleri ise 7. gün için %72,5 ve 28. gün için de %83 bulunmuş olup, karışımlarda kullanılan cürufun kategori 80 sınıfında olduğu ortaya çıkmıştır.

- **Uçucu Kül Aktivite İndeksi**

Uçucu kül için ASTM C 311'e uygun olarak 5 cm'lik küpler ile yapılan uçucu küllü - çimentolu harçlara ait ortalama basınç mukavemetleri her bir yaş için üç değer ortalama alınarak, 7. günde 30 MPa, 28. günde ise 42 MPa'dır. Referans çimentosu ile hazırlanmış harç küplerinin ortalama basınç mukavemetleri 7. günde 40 MPa, 28. günde ise 48 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 6.2). Aktivite indeksleri ise 7. gün için %75 ve 28. gün için de %88 bulunmuş olup, karışımlarda kullanılan külün ASTM deki minimum 70 sınırını geçtiği gözlemlenmiştir.

- **Silis Dumanının Aktivite İndeksi**

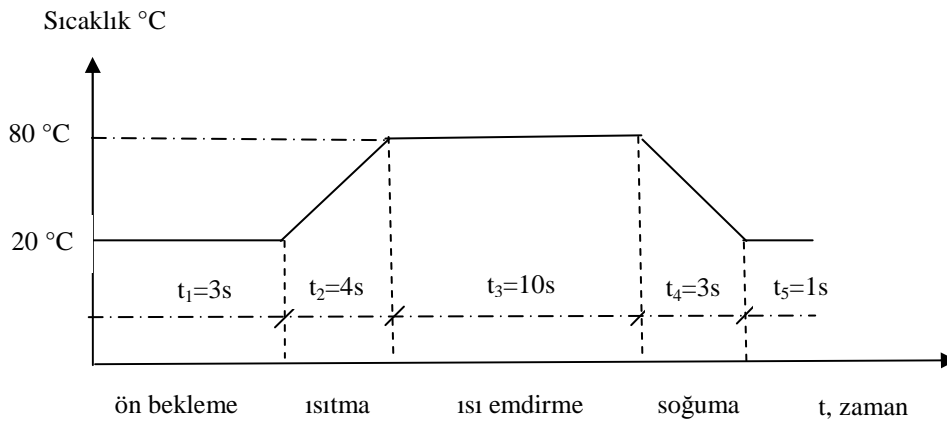
Silis dumanı için ASTM C 1240'e uygun olarak 5 cm'lik küpler ile yapılan silis dumanı ikameli çimentolu harçlara ait ortalama basınç mukavemetleri her bir yaş için üç değer ortalama alınarak, 7. günde 36 MPa, 28. günde ise 55 MPa'dır. Referans çimentosu ile hazırlanmış harç küplerinin ortalama basınç mukavemetleri 7. günde 40 MPa, 28. günde ise 48 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 6.2). Aktivite indeksleri ise 7. gün için %90 ve 28. gün için de %115 bulunmuş olup, karışımlarda kullanılan silis dumanının 28. gün için ASTM deki minimum 110 sınırını geçtiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.2 Pozolanik aktivite deney sonuçları

6.2.2 Buhar Kürü Uygulaması Sonuçları

Şekil 6.3' te görüldüğü gibi buhar küründe uygulanan sıcaklık ve süre bilgileri verilmiştir. Bu şekilde gösterilen t_1 ; ön bekleme süresi (3 saat) , t_2 ; suyun ısınması süresi (4 saat), t_3 ; numunelerin ısıyı emme süresi (10saat) ve t_4 ; tankın kapakları açıldıktan sonra soğuma süresi (3 saat) ve t_5 ; numunelerin tanktan çıkarıldıktan sonra kırma kadar geçen süre (1 saat) olarak belirlenmiştir. Her bir deney türü için üç numune kullanılmış olup bu üç numunenin ortalaması alınmıştır.



Şekil 6.3 Buhar kürü çevrimleri

Tablo 6.2, Tablo 6.3 ve Şekil 6.4' de HB (Silis dumanı % 10 katkılı), HB-U(Silis dumanı %10 + uçucu kül % 20 katkılı) ve HB-Y (silis dumanı % 10 + yüksek fırın cürufu % 20 katkılı) betonların buhar kürü sonucu birim hacim ağırlıklıkları, silindir ve küp basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve yarma dayanımı test sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.2 Buhar kürü sonu b.h.a ve basınç dayanımı deney sonuçları

Beton Türü	Kür	BHA (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	
			Silindir	Küp
HB	Buhar	1862	22,90	22,30
HB-U	Buhar	1827	20,28	21,80
HB-Y	Buhar	1833	16,00	22,02

Tablo 6.2' ye bakıldığında buhar kürü uygulaması sonucu birim hacim ağırlık değerleri 1900 kg/m³ ün altında kalmış olup, basınç dayanımları HB-Y hariç 20 MPa'ı geçmiştir. Bu değerler HB-Y hariç 7 günlük kuru yüzey doymun halde kırılan beton numuneler ile paralellik göstermiştir. Yani buhar kürü ile bir günde elde edilen dayanım, su kürü ile yedi günde elde edilmiştir. HB-Y kodlu silindir numune üzerinde iki farklı zamanda yapılan deneyde basınç dayanımı 16 MPa'ı geçememiştir.

Buhar kürü uygulanan numunelerin çekme dayanımlarının tespiti için eğilmede çekme ve yarmada çekme deneyleri yapılmış olup, bu değerler Tablo 6.3 de verilmiştir.

Tablo 6.3 Buhar kürü sonu eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Beton Türü	Kür	Silindir		Prizma	
		BHA (kg/m ³)	Yarma Day. (MPa)	BHA (kg/m ³)	Eğilme Day. (MPa)
HB	Buhar	1875	2,3	1885	4,1
HB-U	Buhar	1832	2,3	1854	4,0
HB-Y	Buhar	1827	1,9	1863	3,8

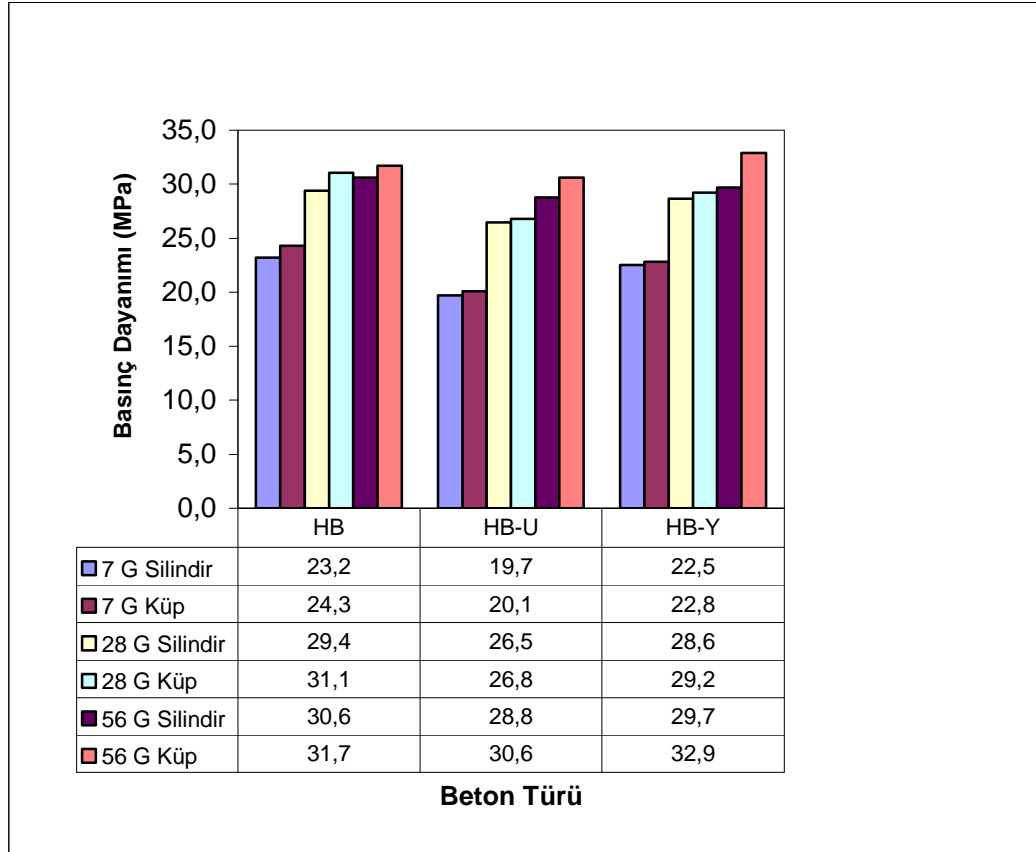
Tablo 6.3 incelendiğinde, buhar kürü görmüş HB betonu ve HB-U betonu hem eğilmede hemde yarmada benzer sonuçlar göstermiştir. En düşük dayanımı ise yine basınç dayanımında olduğu gibi yüksek fırın cürufu katkılı HB-Y betonu göstermiştir. Yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımının HB betonu için % 44' ü, HB-U betonu için % 42' si ve HB-Y betonu için ise % 50 sidir. Normal betonda olduğu gibi hafif betonda da eğilmede çekme dayanımı, yarmada çekme dayanımından yüksek değer vermiştir. Basınç ve çekme dayanımında HB-Y betonunun düşük değer vermesi, 10 saat - 80 °C' lik buhar kürü çevriminin yüksek fırın cürufu katkılı beton için yeterli olmadığını göstermiştir.

6.2.3 KYD ve Etüv Kuru Numunelerin Basınç Dayanımı Sonuçları

Kuru yüzey doymun ve etüv kuru numunelerin basınç dayanımı için 108 adet beton numunesi kullanılmıştır. 7, 28 ve 56. günlerde herbir deney sonucu için 3 adet numunenin ortalaması alınarak sonuçlar bulunmuş ve bu sonuçlar Şekil 6.4 ve Şekil 6.5' te verilmiştir. Çimentonun % 10 silis dumanı ile yer değiştirdiği hafif beton için HB, çimentonun % 10 silis dumanı + % 20 uçucu küle yer değiştirdiği hafif beton için HB-U ve çimentonun % 10 silis dumanı + % 20 yüksek fırın cürufu ile yerdeğiştirdiği hafif beton için HB-Y isimlendirmesi yapılmıştır.

6.2.3.1 Basınç Dayanımı Sonuçları (KYD)

Şekil 6.4' te 7 günlük betonların silindir ve küp deney sonuçlarına baktığımızda HB betonunun yüksek değer verdiği ve bunu HB-Y betonun izlediği görülmüştür. %20 uçucu kül katkılı HB-U betonu 19,7 MPa silindir basınç dayanımı ve 20,1 MPa küp basınç dayanımı ile erken yaşta fazla bir gelişim gösterememiş ve diğer betonların gerisinde kalmıştır. Uçucu kül içeren betonların dayanım gelişiminin ilk zamanlarda daha yavaş olduğu, ama uzun dönemde dayanım kazanmaya devam ettiği, literatürlerde ve araştırmalarda belirtilmektedir (Akçaözoğlu, 2008). 28 günlük silindir ve küp dayanımlarına bakıldığında yine HB betonunun HB-U ve HB-Y betonlarına göre dayanımının yüksek olduğu görülmektedir.

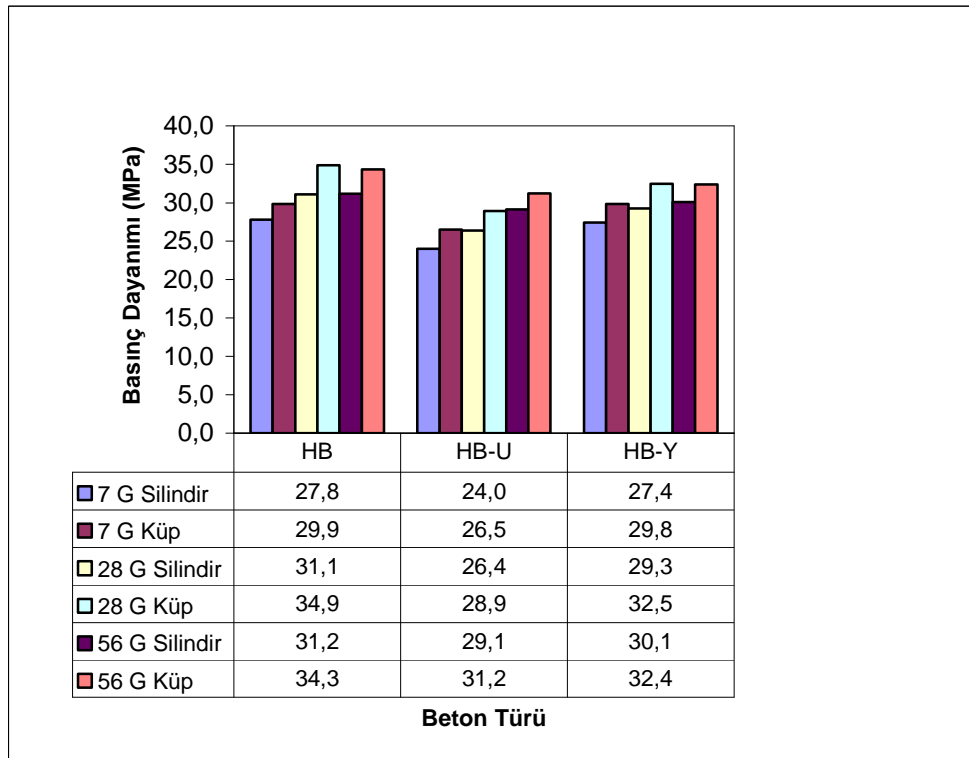


Şekil 6.4 Kuru yüzey doymuş halde kırılan numunelerin 7, 28 ve 56 günlük silindir ve küp basınç dayanım sonuçları

56 günlük silindir dayanımlarına bakıldığında HB ve HB-Y betonlarının yakın değer verdiği, HB-U betonunun bunları neredeyse yakaladığı görülmektedir. Ancak 56 günlük küp dayanım sonuçlarına baktığımızda HB-Y betonunun HB betonunu az bir değerle geçtiği görülmüştür. Literatürde, yüksek fırın cürufu katkılı betonların erken yaşlardaki mukavemetlerinin Portland çimentolu betonun dayanımından düşük olduğunu, ancak son dönem mukavemetlerinin, iyi kür edilmek şartıyla kontrol betonunun mukavemetine eşit ya da daha fazla olduğunu bildiren çok sayıda çalışma mevcuttur (Yeau ve Kim, 2005; Bilim, 2006; Öner ve Akyüz, 2007). 56. günde görülen bu değişim, yüksek fırın cürufunun ilerleyen yaşlarda puzolanik etkisini gösterdiğinin bir sonucudur. Granüle yüksek fırın cürufları, Portland çimentolarına göre daha yavaş hidrate olduğundan, cürufllu betonların erken yaşlardaki mukavemet gelişim oranları daha düşük olmaktadır. Ancak ilerleyen yaşlarda, yüksek fırın cürufunun, agrega-bağlayıcı ara yüzeyinde bulunan boşlukları daha iyi doldurarak betonun basınç dayanımını arttırdığı belirtilmektedir (Akçaözoğlu, 2008).

6.2.3.2 Basınç Dayanımı Sonuçları (ETÜV Kuru)

Su kürü tankından çıkarılan numuneler, 120° C 'ye ayarlanmış etüve konularak 24 saat bekletilmiş ve daha sonra deneye tabi tutulmuştur. 7, 28 ve 56 günlük numunelerin etüv kuru durumundaki silindir ve basınç dayanım sonuçları Şekil 6.5'te verilmiştir. Şekil 6.5 incelendiğinde 120 °C' de 24 saat bekletilen numunelerde, kuru yüzey doymun hale göre gözle görülür bir dayanım artışının olduğu görülmektedir. 7 günlük etüv kuru silindir dayanımları, 7 günlük kuru yüzey doymun silindir dayanımları ile karşılaştırıldığında HB, HB-U ve HB-Y betonları için sırası ile %16.5, %17.9 ve %17.8' lik bir dayanım artışı olurken, 7 günlük küp dayanımları için bu değerler sırası ile % 18.7, % 24.2 ve % 23.5 olmuştur.



Şekil 6.5 Etüv kuru (120 °C) halde kırılan numunelerin 7, 28 ve 56 günlük silindir ve küp basınç dayanım sonuçları

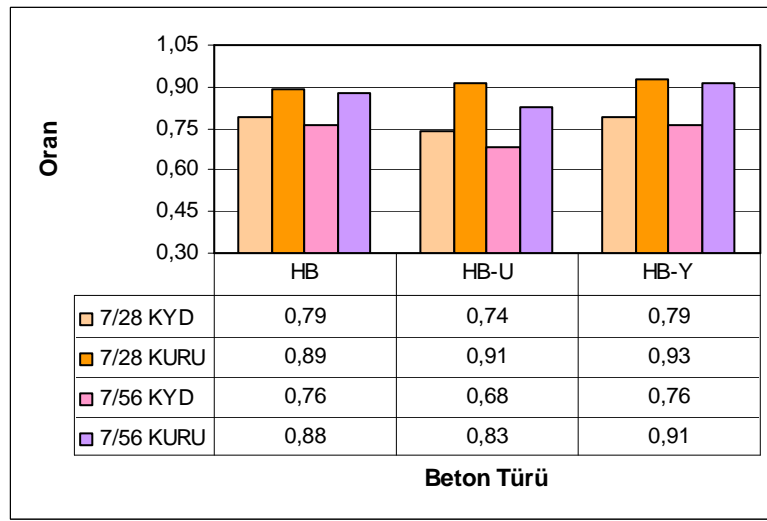
28 günlük etüv kuru silindir dayanımları, 28 günlük kuru yüzey doymun hal silindir dayanımları ile karşılaştırıldığında HB betonu için % 5,5 ve HB-Y betonu

için %2,4' lük bir dayanım artışı olduğu görülmüştür. Öte yandan HB-U betonunda bir değişim gözlenmemiştir. 28 günlük küp dayanımları için ise bu değerler HB, HB-U ve HB,Y betonları için sırası ile % 10.9, % 7.3 ve % 10.2 ' lik dayanım artışı olduğu görülmüştür. 56 günlük etüv kurusu silindir dayanımları ile 56 günlük kuru yüzey doymuş silindir dayanımları karşılaştırıldığında HB, HB-U ve HB-Y betonları için hepsinde %1' lik bir dayanım artışı görülmüştür. 56 günlük küp dayanımlarında ise HB betonunda % 7,6 ve HB-U betonunda % 2'lik bir dayanım artışı görülmüştür. Erken yaşlarda kuru yüzey doymuş ve etüv kurusu durumundaki silindir beton numuneler arasındaki basınç mukavemeti farkı % 16-18 arasındayken, küp numunelerde bu oran % 18-24 değerini almıştır. İlerleyen yaşlarda bu oran silindir numunler için % 1' lere kadar inmiştir.

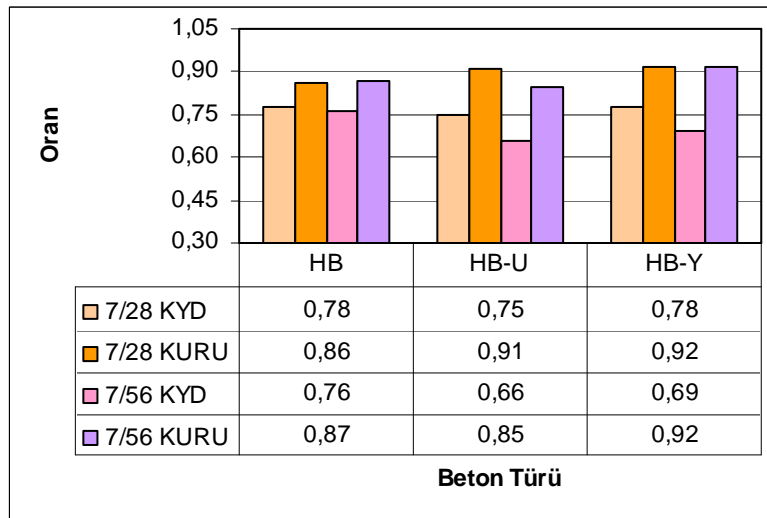
Şekil 6.4 ve Şekil 6.5' den görüleceği gibi, etüv kurusu numunelerin basınç dayanım değerleri, genel olarak tüm günlerde kuru yüzey doymuş halde kırılan numunelerin basınç dayanımı değerlerinden daha büyük çıkmıştır. Bu durum çimentolu, cürufllu ve uçucu küllü numunelerin hepsinde geçerlidir. Bu sonucun, etüvde bekletilen numunenin içindeki suyun tamamına yakını kaybetmesi ve bunun neticesinde daha gevrek bir hal almasından dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir. Bir başka deyişle, kuru yüzey doymuş numuneler içindeki suyun hidrostatik basınç etkisi ile daha düşük basınç dayanımı verdiğini söylemek mümkündür. Bremner and Holm (1995) ve Balendran ve ark. (2002) birim ağırlığı çok düşük olan hafif betonların genelde yük altında oldukça gevrek kırıldığını belirtmektedirler. Birim ağırlığın çok düşük olması, agrega içerisinde çok miktarda boşluğun olduğuna bir işarettir. Bu boşlukların büyük olması agreganın ve dolayısıyla betonun gevrek davranış göstermesine neden olmaktadır. Bu boşluklar yük altında agregada çekme gerilmeleri oluşturarak agreganın düşük yük altında ani ve gevrek kırılmalarına neden olmaktadır.

6.2.4 Numune Yaşının Basınç Dayanımına Etkisi

Şekil 6.6'da 7/28 ve 7/56 günlük HB, HB-U ve HB-Y betonlarının kuru yüzey doygun ve etüv kurusu silindir basınç dayanım oranları verilmiştir. Kuru yüzey doygun halde HB, HB-U ve HB-Y betonları sırası ile 7. günde 28 günlük basınç dayanımının %79, %74 ve %79' unu, 56 günlük basınç dayanımının ise %76, %68 ve %76'sını almıştır. Burada uçucu kül katkılı HB-U betonunun erken yaştaki dayanımı ile ilerleyen yaştaki dayanımı arasındaki farkın daha fazla olduğu görülmüştür.



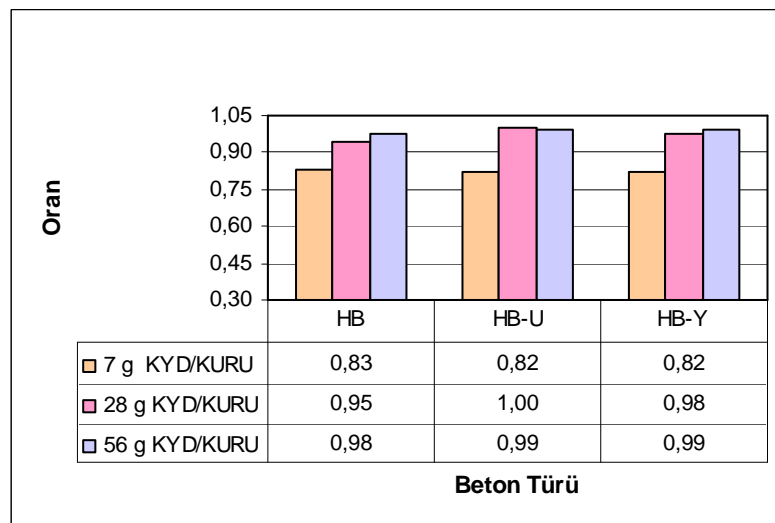
Şekil 6.6. 7/28 ve 7/56 günlük silindir numunelerin KYD ve etüv kurusu basınç dayanım oranları.



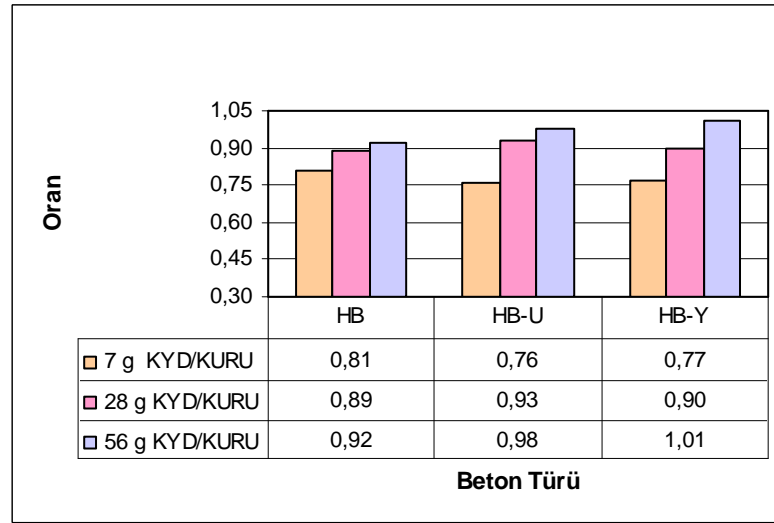
Şekil 6.7. 7/28 ve 7/56 günlük küp numunelerin KYD ve etüv kurusu basınç dayanım oranları

Etüv kuruşu durumda silindir numuneler için HB betonu 7. günde 28 günlük basınç dayanımının %89' unu, HB-U betonu %91' ini ve HB-Y betonu ise %93'ünü kazanmıştır. 56. günde ise HB betonu %88' ini, HB-U betonu %83' ünü ve HB-Y betonu ise % 91' ini kazanmıştır. Etüv kuruşu durumda 7. günde 28 günlük dayanımın ortalama % 90' ı kazanılmıştır. Bu değer kuru yüzey doğun hale göre ortalama % 10 daha fazladır. Diğer bir deyişle, etüv kuruşu durumundaki hafif betonun ilk yaşlardaki dayanımı ile ilerleyen yaşlar arasındaki dayanım farkı daha azdır. Şekil 6.6' da kuru yüzey doğun ve etüv kuruşu durumlarında küp numunelerin 7/28 ve 7/56 dayanım oranları verilmiştir. Bu dayanım oranları da yine silindir numuneler ile paralellik göstermiştir. Yaşlar arasındaki en fazla dayanım farkını uçucu kül katkılı HB-U betonu göstermiştir.

Şekil 6.8' de silindir ve Şekil 6.9' da küp numunelerin 7, 28 ve 56. günlerde kuru yüzey doğun haldeki basınç dayanımlarının, etüv kuruşu durumundaki basınç dayanımlarına oranı verilmiştir. Silindir numuneler için birinci haftada bu oran 0,83-0,84 arasında değişirken 56. günde yaşlarda arasındaki dayanım farkı kapanarak oranlar 0,98-0,99 arasında değişmiştir. 7 ile 28. günler arasındaki oranlar, 28 ile 56. günler arasındaki oranlardan fazla olmuştur.



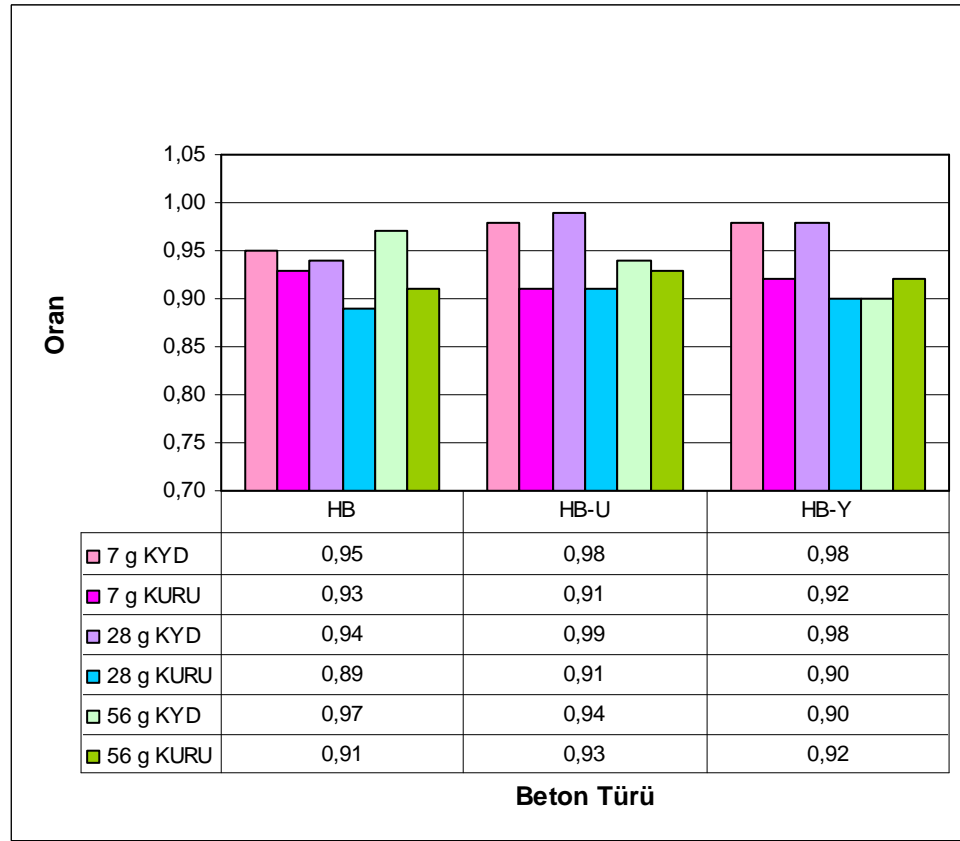
Şekil 6.8 KYD/Etüv kuruşu silindir numunelerin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı oranları



Şekil 6.9 KYD/Etöv kuru küp numunelerin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı oranları

Küp numunelere bakacak olursak; 7. günde KYD ile etöv kuru halinde HB-Y betonu arasındaki basınç dayanımı farkının diğerlerine göre daha fazla olduğu görülür. 28. günde bu fark diğer betonlar ile denk hale gelmiştir. 56. günde ise kuru yüzey doygun haldeki numune, etöv durumundaki numunenin basınç dayanımını geçmiş olup, 1,01 gibi bir oran çıkmıştır.

Şekil 6.10' da kuru yüzey doygun ve etöv kuru numunelerin 7, 28 ve 56 günlük 10/20cm boyutunda silindir numuneler ile 7,5cm ayrıtlı küp numunelerin basınç dayanımı oranları verilmiştir. Bütün numunelerin basınç dayanım oranları 0,90'nın üzerindedir. Bir başka deyişle silindir numune basınç dayanımı, küp basınç dayanımının % 90' nını aşmıştır. Kuru yüzey durumundaki oranlar, etöv kuru durumundaki oranlara göre daha yüksek değerler almıştır.



Şekil 6.10 KYD ve Etüv kuru numunelerin 7, 28 ve 56 günlük silindir / küp basınç dayanımı oranları

Üretilen betonların kuru yüzey doymun halde 28 günlük silindir basınç dayanımı sınıfı TS EN 206-1'e göre HB betonu için LC 30/33 iken, HB-U ve HB-Y betonları LC 25/28' dir. Etüv kuru durumunda ise HB ve HB-Y betonları LC 30/33 sınıfına girerken, HB-U betonu LC 25/28 beton sınıfına girmiştir. 10/20cm boyutundaki 28 günlük KYD haldeki silindir numunenin 7,5cm ayrıtlı küp numuneye oranı HB, HB-U ve HB-Y betonları için sırası ile 0,94, 0,99 ve 0,98 iken, TS EN 206-1'e göre (hava kuru durumunda) aynı beton sınıfına dahil 15/30cm boyutundaki silindir numunenin, 15cm ayrıtlı küp numuneye oranı HB için 0,91, HB-U ve HB-Y betonları için 0,89' dur. Etüv kuru numunelerde ise 10/20cm boyutundaki 28 günlük silindir numunenin 7,5cm ayrıtlı küp numuneye oranı HB, HB-U ve HB-Y betonları için sırası ile 0,89, 0,91 ve 0,90 iken, aynı beton sınıfına dahil 15/30cm boyutundaki silindir numunenin, 15cm ayrıtlı küp numuneye oranı HB ve HB-Y betonları için 0,91 iken HB-U betonu için 0,89' dur.

6.2.5 Birim Hacim Ağırlık-Basınç Dayanımı İlişkisi

Tablo 6.4' de 10*20 boyutunda dökülen silindirik beton numunelerin, doymuş kuru yüzey ve etüv kurusu durumlarında, 7, 28 ve 56. yaşlarda birim hacim ağırlık değerleri ve bunlara karşılık gelen basınç mukavemeti değerleri verilmiştir.

Tablo 6.4 Silindirik numunelerin birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi

Numune Kodu	Gün	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)		Kayıp (BHA)	Basınç Dayanımı (MPa)		Artış (B.Day.)
		DKY	KURU	%	DKY	KURU	%
HB	7	1884	1612	14,4	23,2	27,8	16,5
	28	1882	1582	15,9	29,4	31,1	5,5
	56	1879	1542	17,9	30,6	31,2	2,0
HB-U	7	1851	1523	17,7	19,7	24,0	17,9
	28	1825	1500	17,8	26,5	26,4	-
	56	1836	1487	19,0	28,8	29,1	1,0
HB-Y	7	1860	1645	11,6	22,5	27,4	17,8
	28	1850	1634	11,7	28,6	29,3	2,4
	56	1850	1602	13,4	29,7	30,1	1,3

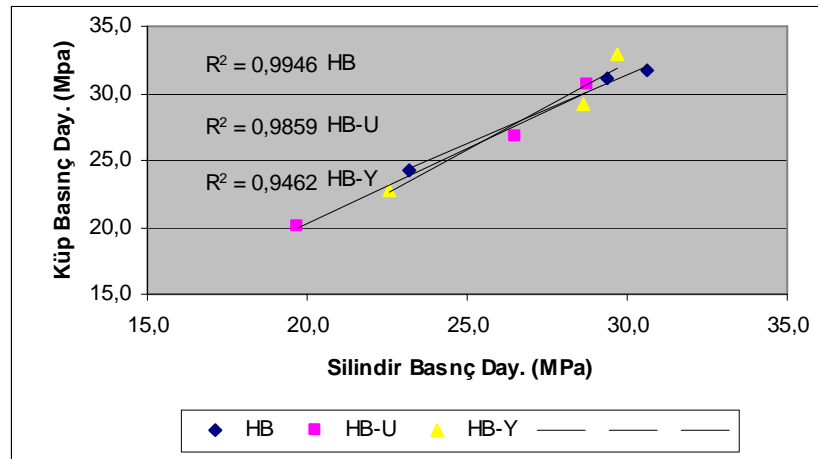
*DKY : Doymuş kuru yüzey, *KURU : Etüv kurusu hali

Tablo 6.4 incelendiğinde, uçucu kül ikameli HB-U numunelerin kuru yüzey doymuş ve etüv kurusu birim ağırlıkları, HB ve HB-Y numunelerinden daha düşüktür. Aynı işlenebilirlik ve aynı karışım miktarı koşulları altında, uçucu külün özgül ağırlığının diğerlerinden düşük olması nedeniyle HB-U betonu daha düşük birim hacim ağırlık değeri göstermiştir. Kür tankından çıkarılan numuneler etüvde bekletildikten sonra tartılıp birim hacim ağırlıkları bulunduğu HB betonu için 7. günde % 14,4, 28. günde % 15,9 ve 56. günde % 17,9'luk bir BHA kaybı gözlemlenmiştir. HB-U betonu için, 7. günde % 17,7, 28. günde % 17,8 ve 56. günde % 19,0'luk bir BHA kaybı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde HB-Y betonu için 7, 28 ve 56. günler için sırası ile % 11,6, % 11,7 ve % 13,4'lük bha kayıpları kaydedilmiştir. Bu fark normal betona göre oldukça fazladır. Bunun nedeni ise kullanılan pomza agregasının boşlukluklarının büyük ve sürekli olmasından dolayı su emme kapasitesinin yüksek oluşudur. Oysa normal agregada bu boşluklar küçük ve süresizdir.

Basınç dayanımı değişimlerine bakılacak olursa 7. günde bütün numunelerde doymun kuru yüzey ve etüv kurusu haldeki betonlardaki dayanım oranı % 16-18 arasında değişirken, bu oran 28. günde %2-6, ve 56. günde % 0-2 arasında değişmiştir. Yani ilerleyen yaşlarda aradaki farkın giderek azaldığı görülmüştür.

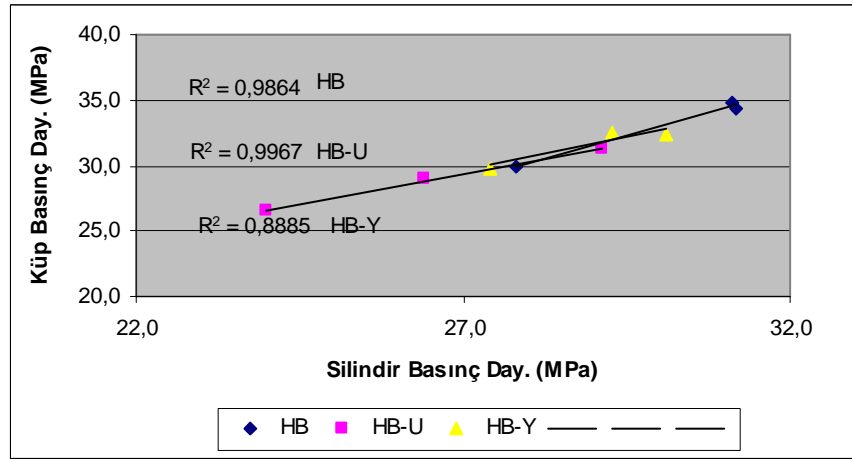
6.2.6 Silindir Basınç Dayanımı ve Küp Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

7, 28 ve 56 günlük *doymun kuru yüzey* durumdaki numunelerin silindir basınç dayanımları ile küp basınç dayanımları arasında bir ilişki kurulmuştur ve bu ilişki Şekil 6.7' de sunulmuştur.



Şekil 6.7 Kuru yüzey doymun halde HB, HB-U ve HB-Y betonlarının silindir basınç dayanımı ve küp basınç dayanımı arasındaki ilişki

Elde edilen korelasyon katsayıları sırası ile HB betonunda 0,99 , HB-U betonunda 0,98 ve HB-Y betonunda 0,94 olarak bulunmuştur. En iyi uyumu HB betonu gösterirken, bunu HB-U ve HB-Y betonları izlemiştir. 7, 28 ve 56 günlük *etüv kurusu* durumundaki numunelerin silindir basınç dayanımları ile küp basınç dayanımları arasında yine bir ilişki kurulmuştur ve bu ilişki Şekil 6.8' de gösterilmiştir.

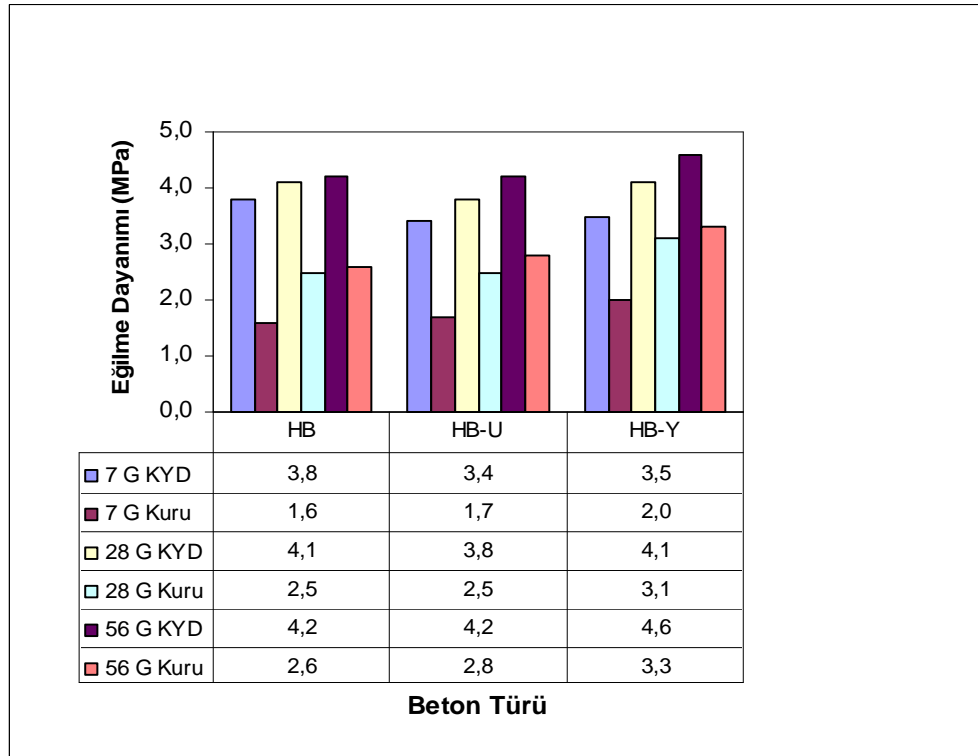


Şekil 6.8 Etüv kurusu hal HB, HB-U ve HB-Y betonlarının silindir basınç dayanımı ve küp basınç dayanımı arasındaki ilişki

Elde edilen korelasyon katsayıları sırası ile HB betonunda 0,98, HB-U betonunda 0,99 ve HB-Y betonunda 0,88 bulunmuştur. Yine burada da en iyi ilişkiyi HB ve HB-U betonu gösterirken HB-Y betonu bu değerlerin biraz gerisinde kalmıştır. Şekillerden küp basınç dayanımları ile silindir basınç dayanımları arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir. Betonların korelasyon katsayısı etüv kurusu numuneler için (R^2) 0,88~0,99 arasında değerler alırken, kuru yüzey doymun durumdaki numuneler için (R^2) 0,94~0,99 arasında değerler almıştır.

6.2.7 Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları

Eğilmede çekme dayanımı için 7,5*7,5*30 cm boyutunda prizmatik numuneler kullanılmıştır. Değişik yaşlarda numuneler kür tankından çıkarıldıktan sonra kuru yüzey doymun halde ve etüv kurusu halde deneye tabi tutulmuştur. Doymun kuru yüzey ve etüv kurusu durumundaki prizma numuneleri için eğilmede çekme dayanım sonuçları Şekil 6.9' da verilmiştir.



Şekil 6.9 Doygun kuru yüzey ve etüv kurusu durumundaki numunelerin eğilmede çekme dayanımı sonuçları

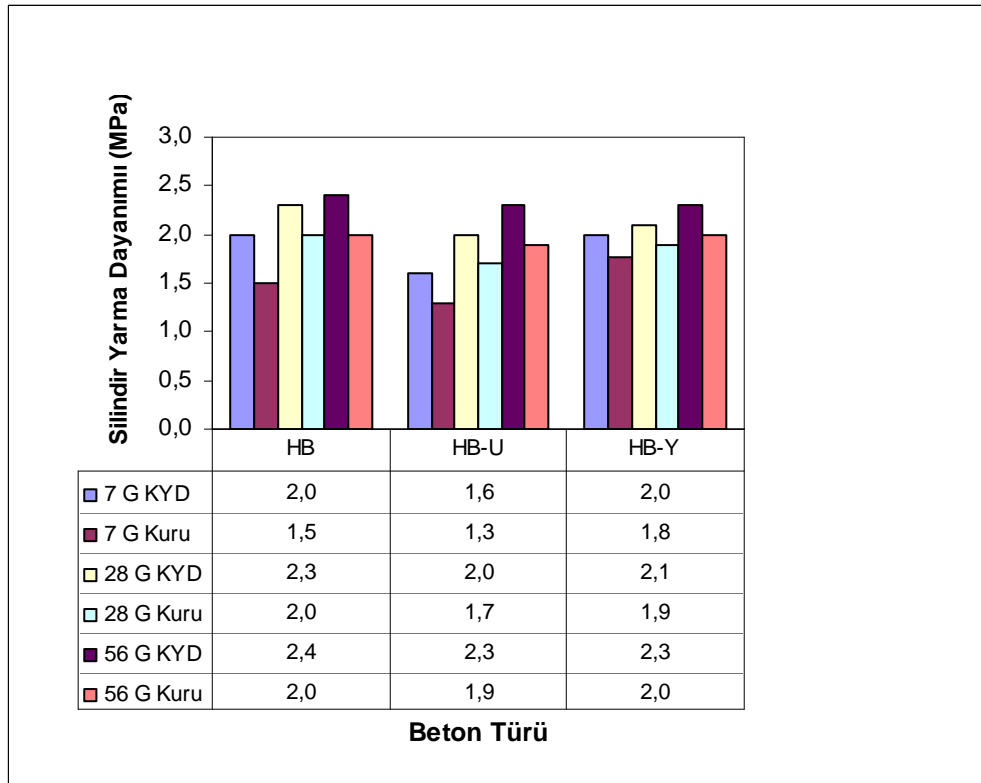
HB betonu 7. gün sonunda kuru yüzey doygun halde $3,8 \text{ N/mm}^2$ değer verirken, HB-U ve HB-Y betonları sırası ile $3,4 \text{ N/mm}^2$ ve $3,5 \text{ N/mm}^2$ lik değerler vermiştir. Eğilme dayanımındaki bu değişim basınç dayanımındaki ile paralellik göstermektedir. Etüv kurusu durumunda 7. günde ise HB, HB-U ve HB-Y betonları sırası ile $1,6 \text{ N/mm}^2$, $1,7 \text{ N/mm}^2$ ve $2,0 \text{ N/mm}^2$ eğilme dayanımları göstermiştir. 28. günde kuru yüzey doygun halde HB, HB-U ve HB-Y betonları sırası ile $4,1 \text{ N/mm}^2$, $3,8 \text{ N/mm}^2$ ve $4,1 \text{ N/mm}^2$ değerler verirken, etüv kurusu durumunda $2,5 \text{ N/mm}^2$, $2,5 \text{ N/mm}^2$ ve $3,1 \text{ N/mm}^2$ eğilme dayanımları göstermiştir. Uçucu kül ikamesinin eğilme dayanım değerlerini düşürdüğü, ancak bu düşüşün basınç dayanımlarındaki kadar fazla olmadığı görülmektedir. 56. günde ise kuru yüzey doygun halde HB, HB-U ve HB-Y betonları sırası ile $4,2 \text{ N/mm}^2$, $4,2 \text{ N/mm}^2$ ve $4,6 \text{ N/mm}^2$ değer verirken, etüv kurusu durumunda aynı cins betonlar sırasıyla $2,6 \text{ N/mm}^2$, $2,8 \text{ N/mm}^2$ ve $3,3 \text{ N/mm}^2$ lik eğilme dayanımları göstermiştir.

7. günde en yüksek dayanımı HB betonu gösterirken, en düşük dayanımı uçucu kül katkılı HB-U betonu göstermiştir. 56. günde ise HB-U betonu, HB betonunu

yakalarken, en yüksek dayanımı yüksek fırın cürufu katkılı HB-Y betonu göstermiştir. Kuru yüzey doymun hal ve etüv kurusu durum, bağlayıcı türüne bağlı olarak incelendiğinde, sadece silis dumanı katkılı HB kodlu numuneler, eğilme değerleri açısından en fazla etkilenmiştir denilebilir. HB betonundan sonra uçucu kül katkılı HB-U betonu kuru kür koşullarından daha fazla etkilenmiş görünmektedir. Yüksek fırın cürufu katkılı HB-Y numuneler ise her yaş için kuru kür koşullarından en az etkilenen numunelerdir.

6.2.8 Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları

Yarmada çekme dayanımı için 10*20 cm boyutlarında silindir numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler değişik yaşlarda (7, 28 ve 56) su kürüne tabi tutulduktan sonra bir kısmı doymun kuru yüzey halde, bir kısmı da etüv kurusu durumunda silindir yarma deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerden elde edilen veriler Şekil 6.10' da sunulmuştur.

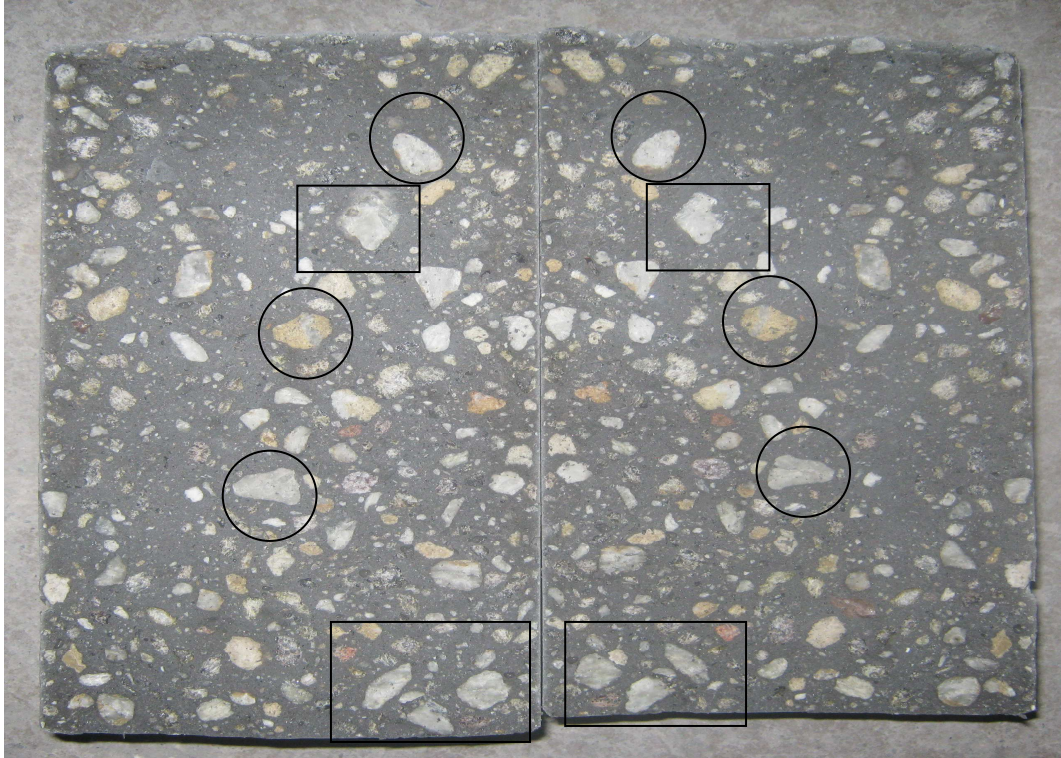


Şekil 6.10 Doymun kuru yüzey ve etüv kurusu durumundaki numunelerin silindir yarmada çekme dayanımı sonuçları

7. günde kuru yüzey doymun halde HB, HB-U ve HB-Y betonları sırası ile 2,0 N/mm², 1,6 N/mm² ve 2,0 N/mm² değer alırken, etüv kurusu halde ise 1,5 N/mm², 1,3 N/mm² ve 1,8 N/mm² 'lik değer almıştır. Etüv kurusu halde bu değerler oldukça düşük dayanım göstermiştir. 28. günde kuru yüzey doymun halde HB, HB-U ve HB-Y betonları sırası ile 2,3 N/mm², 2,0 N/mm² ve 2,1 N/mm² değer alırken, etüv kurusu halde ise 2,0 N/mm², 1,7 N/mm² ve 1,9 N/mm² 'lik değer almıştır. 56. güne gelecek olursak kuru yüzey doymun halde HB, HB-U ve HB-Y betonları sırası ile 2,4 N/mm², 2,3 N/mm² ve 2,3 N/mm² dayanım gösterirken, etüv kurusu durumda 2,0 N/mm², 1,9 N/mm² ve 2,0 N/mm² 'lik dayanım göstermiştir. Sönmezoğlu (2005), hafif betonun mekanik özellikleri üstüne yapmış olduğu çalışmada su kürü, naylon kürü ve hava kürüne tabi tuttuğu numuneleri yarma deneyine tabi tutmuş ve sonuçta hava kürü uygulanan numunenin, su kürü uygulanan numuneye göre daha düşük dayanım gösterdiği neticesine varmıştır.

Lee (2002), uçucu küllü betonların yarmada çekme dayanımlarını, basınç dayanımlarının yaklaşık %12'si olarak bulmuştur. Normal betonlarında bu oranın %8-10 arasında olduğunu, uçucu küllü betonların çekme dayanımlarına önemli bir değişiklik yapmadığını belirtmiştir. Bizim yapmış olduğumuz deneyde ise 28 günlük silindir yarmada çekme dayanımları basınç dayanımlarının KYD hal için HB betonunda %8'i, HB-U betonunda %7,5'i ve HB-Y betonunda % 7,3' ü bulunmuştur. Etüv kurusu halinde ise bütün numunelerde yarmada çekme dayanımı, basınç dayanımının % 6,4' ü kadardır.

Şekil 6.11' de yarma deneyine tabi tutulmuş numunenin ikiye ayrılmış hali görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi yarıma hafif agregaların kırılmasıyla gerçekleşmiştir. Birinci parçada olan kırılmış agregaların simetrisini ikinci parçada görmek mümkündür.



Şekil 6.11 Yarma deneyine tabi tutulmuş numune

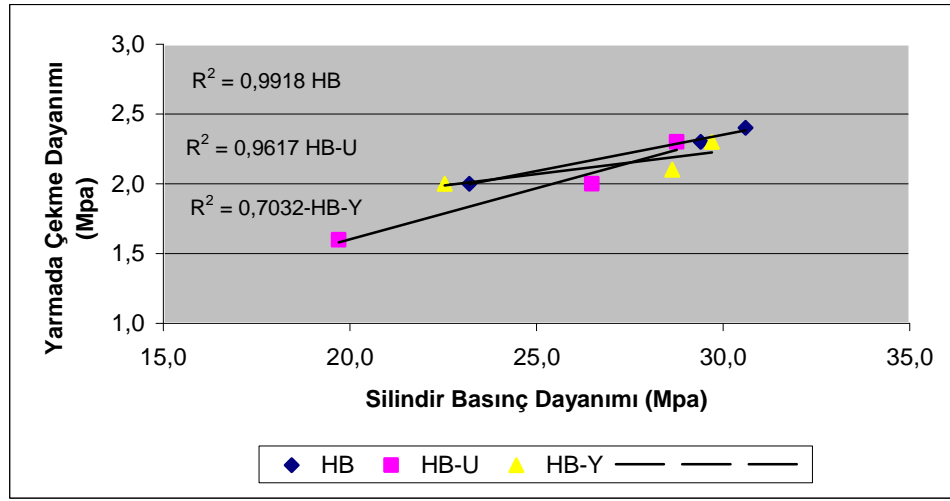
Ulus (2007) perlit agregası kullanarak ürettiği yüksek dayanımlı hafif beton çalışmasında agregalarda gerçekleşen kırılmayı şöyle açıklamıştır ;

1-Yüzey dokuları pürüzlü ve gözenekli olduğu için, agrega ile çimento matrisi arasında oldukça kuvvetli bir bağın oluşması,

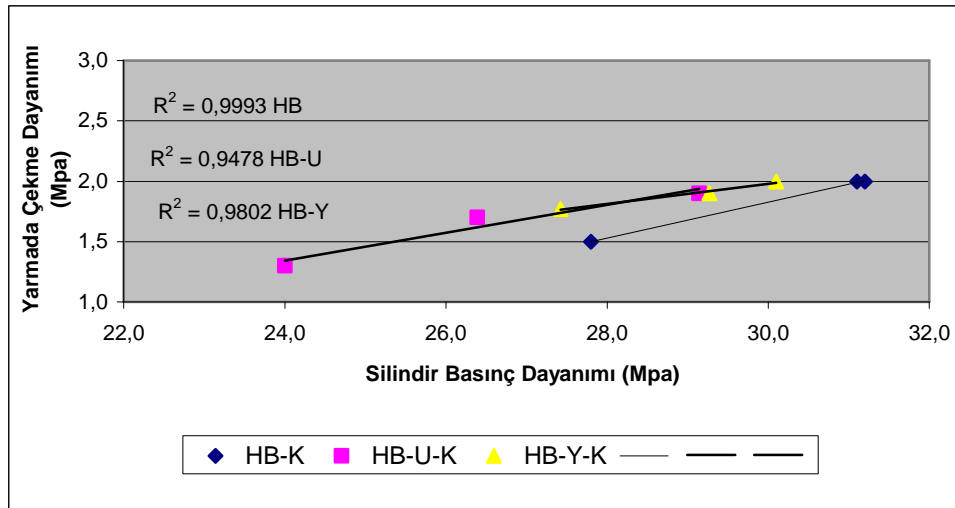
2-Agrega içerisindeki boşlukların agrega mukavemetini düşürmesidir.

6.2.9 Silindir Basınç Dayanımı ile Yarmada Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki

Şekil 6.12 ve Şekil 6.13' de *doygun kuru yüzey* ve *etüv kurusu* durumundaki HB, HB-U ve HB-Y betonlarının yarmada çekme dayanımları ile silindir basınç dayanımları arasındaki ilişki verilmiştir. Doygun kuru yüzey durumunda korelasyon katsayılarına bakacak olursak, HB ve HB-U betonun daha iyi bir ilişki gösterdiği görülmüştür. Etüv kurusu durumunda ise korelasyon katsayılarından betonların arasındaki ilişkinin gayet iyi bir sonuç sergilediği görülmüştür. Koçkal (2008), hafif betonların yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranları normal betonunkilerle benzer özellik gösterdiğini belirtmiştir.



Şekil 6.12 Doymun kuru yüzey hal HB, HB-U ve HB-Y betonlarının yarmada çekme dayanımı ile silindir basınç dayanımı arasındaki ilişki

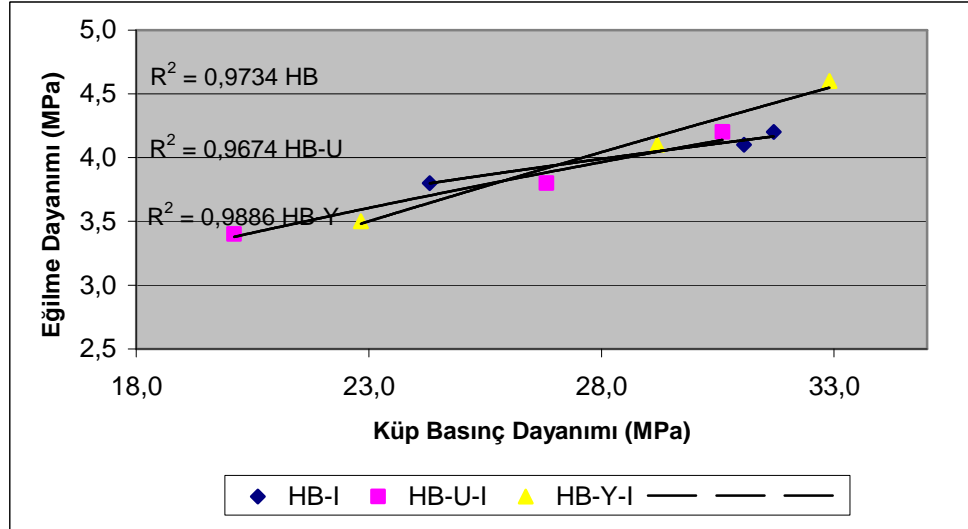


Şekil 6.13 Etüv kurusu hal HB, HB-U ve HB-Y betonlarının yarmada çekme dayanımı ile silindir basınç dayanımı arasındaki ilişki

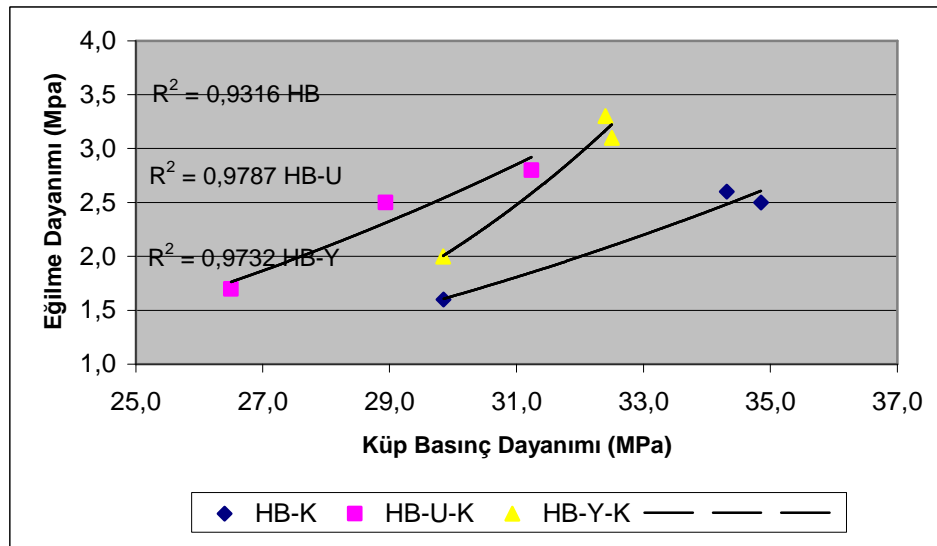
6.2.10 Eğilmede Çekme Dayanımı ve Küp Basınç Dayanımı Arasındaki ilişki

Şekil 6.14 ve Şekil 6.15' de *doymun kuru yüzey* ve *etüv kurusu* durumundaki HB, HB-U ve HB-Y betonlarının eğilmede çekme dayanımları ile küp basınç dayanımları arasındaki ilişki verilmiştir. Doymun kuru yüzey durumunda korelasyon katsayılarına bakılacak olursa, HB ve HB-U betonun daha iyi bir ilişki gösterdiği görülmüştür.

Etüv kuruysu duruyunda ise korelasyon katsayılarının gayet iyi bir sonuç sergilediği görülmüstür.



Şekil 6.14 Doygun kuru yüzey hal HB, HB-U ve HB-Y betonlarının eğilmede çekme dayanımı ile küp basınç dayanımı arasındaki ilişki

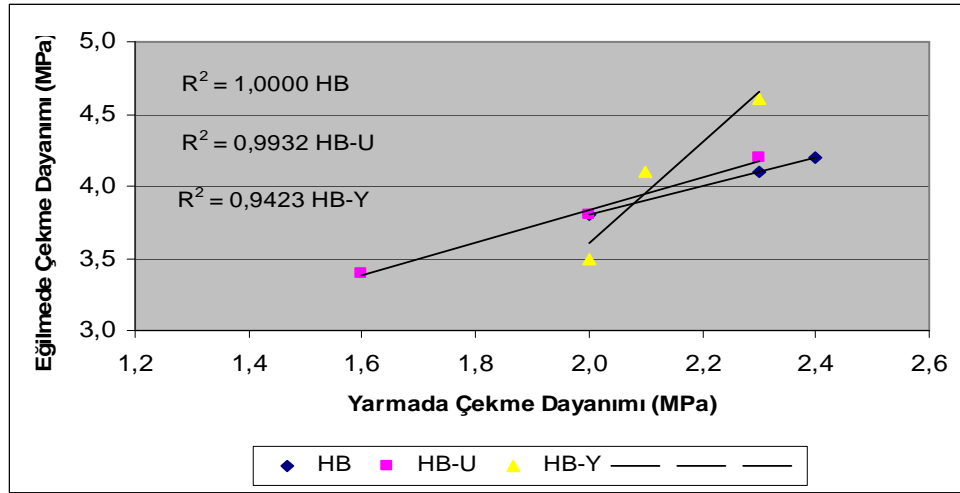


Şekil 6.15 Etüv kuruysu hal HB, HB-U ve HB-Y betonlarının eğilmede çekme dayanımı ile küp basınç dayanımı arasındaki ilişki

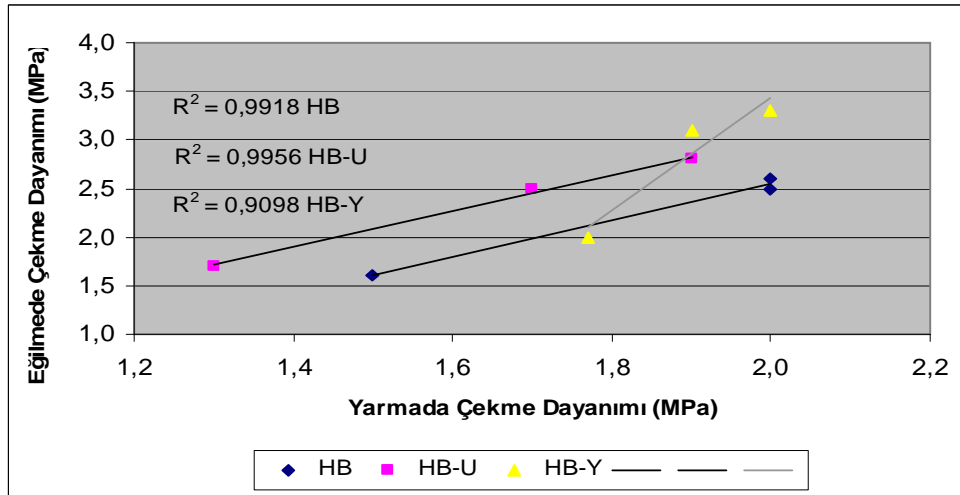
Bilim (2006), cüruf katkılı harç ve beton numuneler üzerinde gerçekleştirdiği çalışma sonucunda, cürufly harçların basınç ve eğilme mukavemetleri arasında kuvvetli bir ilişkinin bulunduğunu ve bu durumun hem ıslak hem de kuru kür şartları için geçerli olduğunu bildirmiştir.

6.2.11 Eğilmede Çekme ve Yarmada Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki

Şekil 6.16 ve Şekil 6.17' de *doygun kuru yüzey* ve *etiiv kurusu* durumundaki HB, HB-U ve HB-Y betonlarının eğilmede çekme dayanımları ile yarmada dayanımları arasındaki ilişki verilmiştir. Doygun kuru yüzey halde HB betonun korelasyon katsayısı $R^2 = 1$ ile en iyi ilişkiyi göstermiştir. İkinci iyi ilişkiyi $R^2 = 0,99$ ile uçucu kül katkılı HB-U betonu sergilemiştir. HB-Y betonu nun ise korelasyon katsayısı $R^2 = 0,94$ bulunmuştur.



Şekil 6.16 DKY durumda HB, HB-U ve HB-Y betonlarının eğilmede çekme dayanımı ile yarmada dayanımı arasındaki ilişki

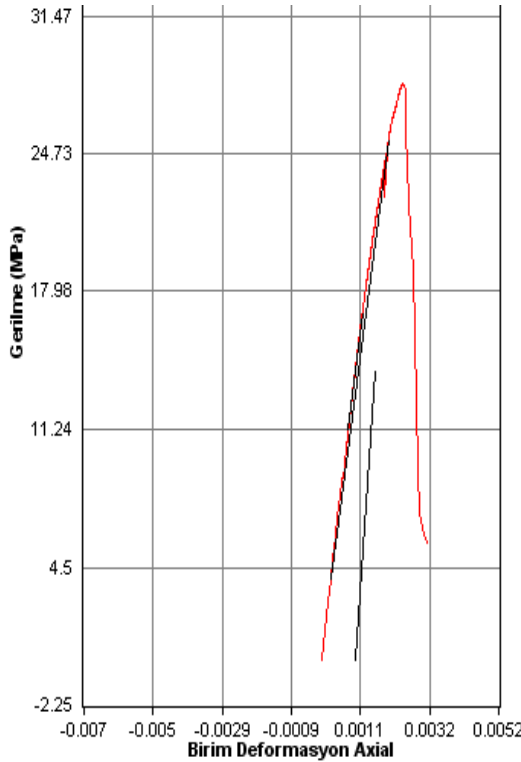


Şekil 6.17 Etiiv kurusu durumda HB, HB-U ve HB-Y betonlarının eğilmede çekme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

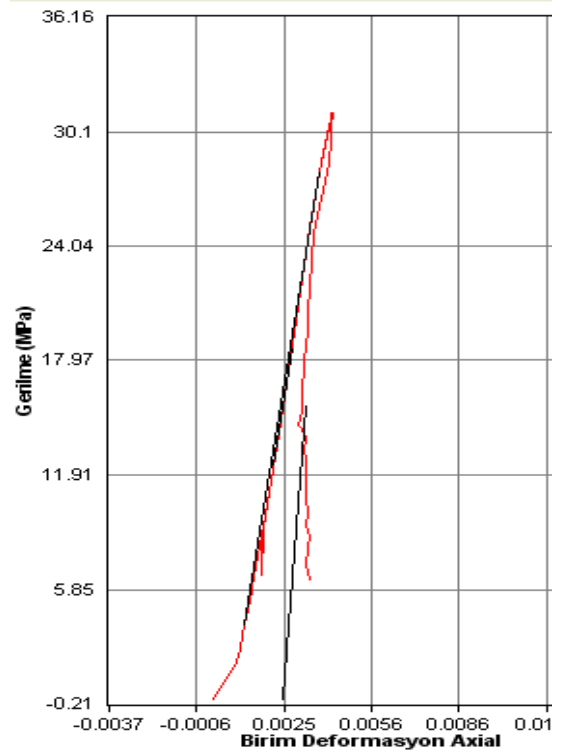
Etüv kurusu durumunda ise korelasyon katsayıları HB için 0,99, HB-U için 0,99 ve HB-Y için 0,90 bulunmuştur. HB ve HB-U arasındaki ilişki HB-Y betonuna göre daha iyi olmuştur. Silis dumanı ile uçucu kül karışımı, silis dumanı ile yüksek fırın cürufu karışımından daha iyi sonuç vermiştir.

6.2.12 Gerilme-Birim Deformasyon İlişkisi

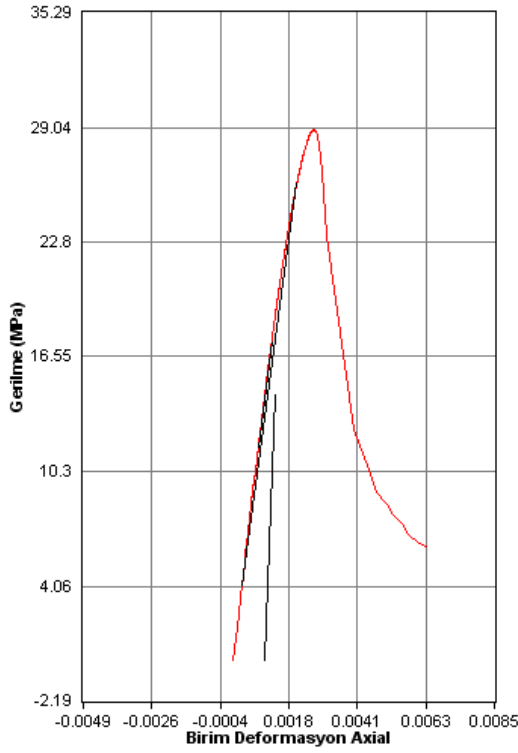
Gerilme-birim deformasyon ilişkisinin belirlenmesinde, betona gerilmeler uygulanmış ve betonun gösterdiği deformasyonlar ele alınmıştır. Bu ilişkinin belirlenmesinde 10x20 cm boyutlu silindir numune kullanılmış ve basınç deneyinde olduğu gibi deney presinde yüklemeye tabi tutulmuştur. İlk önce numunenin etrafına “strain gauge” aparatları yerleştirilmiştir. Bu sayede deformasyonlar ölçülebilmştir. Kırım tamamlanınca bilgisayar programından gerilme-birim deformasyon eğrisi alınmıştır. Şekil 6.18, Şekil 6.19, Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22, Şekil 6.23’ de kuru yüzey doygun hal ve etüv kurusu durumdaki 28 günlük numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



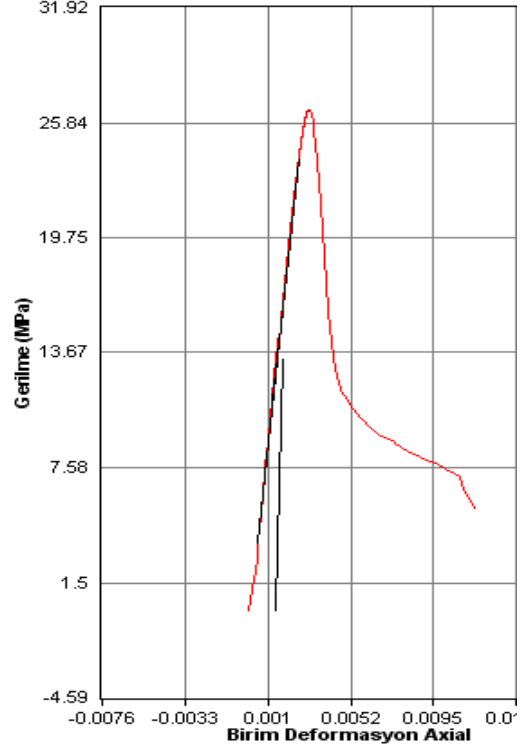
Şekil 6.18 KYD hal HB betonu gerilme-birim birim deformasyon ilişkisi



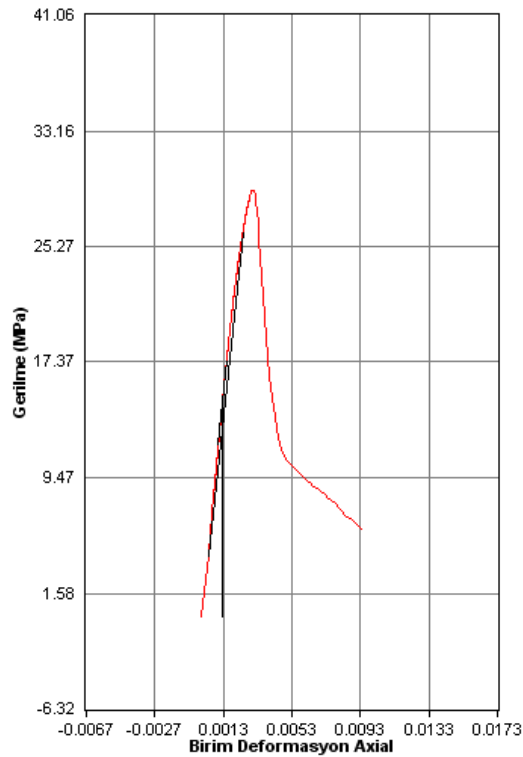
Şekil 6.19 Etüv kurusu HB betonu gerilme-birim deformasyon ilişkisi



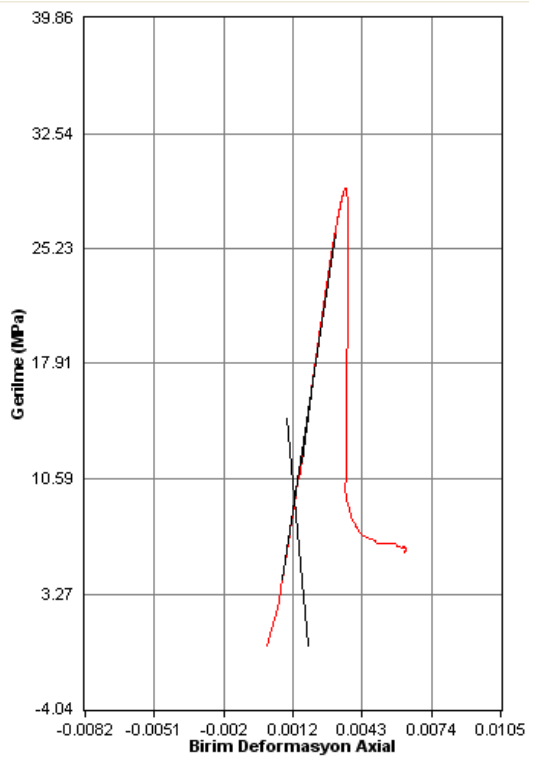
Şekil 6.20 KYD hal HB-U betonu gerilme-birim deformasyon ilişkisi



Şekil 6.21 Etiv kurusu HB-U betonu gerilme-birim deformasyon ilişkisi



Şekil 6.22 KYD hal HB-Y betonu gerilme-birim deformasyon ilişkisi



Şekil 6.23 Etiv kurusu HB-Y betonu gerilme-birim deformasyon ilişkisi

Maksimum gerilme değerinde etüv kuru numuneler kuru yüzey doğun haldeki numunelere göre daha çok Şekil deęiŐimini göstermiştir. Ayrıca kopma esnasında kuru numunelerde σ - ϵ eğrisinin kuyruk kısmı, doğun kuru yüzey numunelere göre daha uzundur. Betonun daha çok heterojenliğe sahip olması, betondaki σ - ϵ eğrisinin kuyruk kısmının daha uzun olmasına neden olmaktadır. σ - ϵ eğrisinin kuyruk kısmının uzun olması, kırılmanın hemen yer almadığını, betonun sünek bir malzeme gibi davranış gösterdiğini belirtmektedir (Erdoğan 2003). Agreganın ve matrisin gerilme deformasyon eğrileri lineer bir doğrudan oluŐurken, betonun bu eğrisinin parabol olmasının nedeni; betonun elastisite modülü deneyi sırasında, gerilmenin artmasıyla, agregaya göre daha düşük dayanıma sahip olan çimento matrisinde çatlakların oluŐmasıdır. Oluşan bu çatlağın hareketinin agrega ve agrega matris aderansı tarafından sınırlandırılması sonucunda gerilme deformasyon eğrisinin Őekli lineerden parabole dönüŐür (Neville, 1995). Yukarıda verilen gerilme-birim deformasyon eğrilerine bakıldığında, gerilme artışı en yüksek gerilmeye ulaŐana kadar doğrusal olarak artmaktadır. Fakat bu durum normal betonlar için söz konusu değildir. Normal betonlarda gerilme-birim deformasyon eğrisi ilk önce doğrusal devam ediyor, kırılma anına gelinceye kadar bu doğrusallık kayboluyor. Hafif betonda maksimum gerilmeye kadar lineer artış gösteren σ - ϵ eğrisinin, normal betona göre daha doğrusal olmasının nedeni, hafif betonda ara yüzeyin normal betona göre daha kuvvetli olmasıdır.

Betonun diğer özelliklerinin yanı sıra, özellikle yük altındaki davranışının bilinmesi, daha sağlıklı yapı tasarımına imkan sağlayacaktır. Genelde hafif agregalar, normal agregalara göre daha düşük elastisite modülüne sahip olduklarından, hafif agregalı betonlar yük altında normal betonlara göre daha fazla deformasyon yapabilmektedir (Faust and Konig 1997). Betonda pomza agregası katkı oranının artması ile maksimum gerilmeye karşılık gelen Şekil deęiŐirme değeri de artmaktadır (Dinçer ve Çatay, 2004).

6.2.13 Elastisite Modülü Sonuçları

Geleneksel betonunun elastisite modülü, hafif betonlarınkinin yaklaşık olarak iki katıdır. Bu durum, kesit boyutları, donatı konum ve özellikleri birbirine eşit olan geleneksel ve hafif betondan üretilmiş iki farklı yapı elemanından hafif betonla üretilmiş olanın eğilme rijitliği daha düşük olacağından, aynı yük altında daha fazla şekil değiştirme yapacağını göstermektedir. Geleneksel betonların birim kısaltmaları, hafif betonlarınkinden daha küçük olmaktadır. Bu durum, hafif betonların şekil değiştirme kapasitelerinin dolayısıyla da sünekliklerinin daha büyük olduğunu göstermektedir (Arslan, 2007).

Doymun kuru yüzey ve etüv kurusu numunelerin 28 ve 56 günlük elastisite modüllerini bulmak için her bir karışım için 3'er adet 10/20 boyutunda silindir numuneler kullanılmıştır. Yük 0,5 kN/s olarak uygulanmıştır. Strain gauge aparatlarıyla yapılan kırılmalar sonucunda deneylerden elde edilen veriler excel ortamına aktarılmış, buradan maksimum gerilmenin % 40'ına kadar olan kısım alınarak yeni gerilme – birim deformasyon eğrileri oluşturulmuştur. En küçük kareler yöntemi kullanılarak, buradan elde edilen doğru denkleminde elastisite modülleri tek tek bulunarak bunların ortalaması alınmıştır (Tablo 6.5).

Tablo 6.5 incelendiğinde farklı iki yaşta doymun kuru yüzey numunelerin etüv kurusu numunelere göre yüksek değer verdiği görülmüştür. Bunun yanında, doymun kuru yüzey numunelerde yaş ilerledikçe elastisite modülünün arttığı görülmektedir. Bu durum basınç dayanımındaki değişim ile paralellik göstermektedir. Benzer basınç dayanımlarına göre normal betonlar için elastisite modülü değerleri 28,000 – 32,000 MPa arasında değer alırken burada doymun kuru yüzey numuneler 12,000 - 15,000 MPa arasında değer almıştır. Değerlere bakıldığında diğerlerine göre en düşük değeri uçucu kül katkılı hafif beton numunesi vermiştir. Öte yandan, etüv kurusu numunelerin elastisite modülü değerleri, doymun kuru yüzey numunelerinkine göre oldukça düşük değer vermiştir.

Tablo 6.5' te KYD ve etüv kurusu durumundaki 28 ve 56 günlük numunelerin birim hacim ağırlık değerleri, basınç dayanımı değerleri, deneysel yolla ve değişik standartlara göre elde edilen elastisite modülü sonuçları ve bu elastisite modülü sonuçları arasındaki farklar verilmiştir.

ACI (318) tarafından birim hacim ağırlığı 1440 ile 2480 kg/m³ arasında yer alan betonlar için önerilen elastisite modülü denklemi, denklem (6.1)' de verilmiştir.

$$E_c = w_c^{1.5} \cdot 0,043 \sqrt{f_c}, 21 < f_c < 35 \text{MPa}, 1440 < w_c < 2480 \quad (6.1)$$

BS 8110 tarafından birim hacim ağırlığı 1400 ile 2320 kg/m³ arasında yer alan betonlar için önerilen elastisite modülü denklemi, denklem (6.2)' de verilmiştir.

$$E_c = w_c^2 \cdot 0,0017 \cdot f_c^{0.33}, 1400 < w_c < 2320 \quad (6.2)$$

Burada; W_c =Birim hacim ağırlık (kg/m³), f_c = Beton silindir basınç dayanımı (MPa) ve E = Elastisite modülünü (MPa) ifade etmektedir. Bu denklem kullanılarak teorik olarak elastisite modülü hesaplanmış olup Tablo 6.5 te verilmiştir.

Tablo 6.5 KYD ve etüv kurusu numunelerin birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve elastisite modülleri karşılaştırması

Num. Kodu	Gün	Numune Durumu	Birim Hacim. Ağırlık. (kg/m³)	Basınç Day. (MPa)	Elastisite. Modülü (MPa) (deney.)	Elastisite. Modülü (MPa) (ACI)	Elastisite Modülü (MPa) (BS)	Fark (ACI)	Fark (BS)
HB	28	Dky	1882	29,4	14589	19036	18376	23,4	20,6
HB	28	Etüv	1582	31,1	10430	15089	13227	30,9	21,1
HB-U	28	Dky	1825	26,5	13395	17258	16697	22,4	19,8
HB-U	28	Etüv	1500	26,4	10736	12835	11266	16,4	4,7
HB-Y	28	Dky	1836	28,6	12462	18091	17330	31,1	28,1
HB-Y	28	Etüv	1487	29,3	10270	13347	11459	23,1	10,4
HB	56	Dky	1879	30,6	15576	19374	18561	19,6	16,1
HB	56	Etüv	1542	31,2	7110	14544	12580	51,1	43,5
HB-U	56	Dky	1850	28,8	13872	18362	17636	24,5	21,3
HB-U	56	Etüv	1634	29,1	7610	15321	13805	50,3	44,9
HB-Y	56	Dky	1850	29,7	14777	18647	17816	20,8	17,1
HB-Y	56	Etüv	1602	30,1	7292	15127	13418	51,8	45,7

Deneyisel ve teorik olarak elastisite modülleri karşılaştırıldığında, 28 ve 56 günlük etüv kurusu ve doygun kuru yüzey durumundaki numunelerde, ACI 318' e göre teorik formülle bulunan elastisite sonucu değerleri, BS 8110' a göre bulunan teorik sonuçlardan daha yüksek çıkmıştır. Deneysel sonuç ile ACI 318' e göre elde edilen elastisite modülü karşılaştırıldığında; kuru yüzey doygun halde HB ve HB-U betonları arasındaki fark %22-23 arasında iken, HB-Y betonunda bu fark % 30' a çıkmıştır. Etüv kurusu durumunda bu farklar HB betonu için % 31, HB-U betonu için % 16 ve HB-Y betonunda % 23 bulunmuştur. Etüv kurusu durumunda HB-U ve HB-Y betonları arasındaki fark KYD durumuna göre düşmüştür. 56. günde ise KYD halde aradaki fark % 20-25 iken, etüv kurusu durumunda bu fark % 50'ye dayanmıştır. BS 8110' a göre KYD haldeki 28 günlük HB ve HB-U betonları için fark %20 iken HB-Y betonunda bu fark % 28 olmuştur. ACI 318' de olduğu gibi HB-Y betonundaki fark daha yüksek çıkmıştır. Etüv kurusu durumunda ise bu farklar HB betonu için % 21, HB-U betonu için % 5 ve HB-Y betonunda % 10 bulunmuştur. 56. günde KYD halindeki numunelerde oluşan fark %16-21 arasında iken etüv kurusu durumunda bu fark ortalama % 44 gibi bir değer almıştır.

Betonun elastisite modülünün, yükleme koşulları ve nem durumu, agreganın porozitesi, rijitliği, elastisite modülü, ara yüzeyin porozitesi, matrisin dayanımı gibi özelliklere bağlı olarak değişmesi göz önünde bulundurulduğunda deneysel veriler ile teorik veriler arasındaki farkın olması doğal bir durumdur. Bu farkın aşırı olmaması gerekmektedir ki Tablo 6.5' ten de görüldüğü gibi bu fark 56 günlük etüv kurusu numuneler hariç diğerlerinde %30'u geçmemiştir. Birçok araştırmacı; betonun elastisite modülünün, birim ağırlığa ve basınç dayanımına bağlı olarak değiştiğini belirtmektedir. Teorik ve deneysel olarak belirlenen elastisite modülü değerleri arasında bazen büyük farkların olabileceğini, bu farkında; betonun elastisite modülünün birim ağırlık ve basınç dayanımının yanında iri agreganın çeşidine, yüzey dokusuna, üretilen hafif betonun normal ağırlıklı, normal ve hafif agrega karışımı veya tamamı hafif agrega kullanılmasına bağlı olarak değişmesinden ortaya çıktığını belirtmektedirler (Ulus, 2007).

Ramyar (1993), uçucu külün betonun elastisite modülüne önemli bir etkisinin olmadığını bildirmiştir. Siddique (2004), uçucu küllü betonların elastisite modülünün 28 günde azaldığını ancak devamlı ve önemli bir gelişmenin ve artışın 28 günden sonra meydana geldiğini belirtmiştir. Ulusu (2007), ham perlit agregası kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretmiş ve bunların elastisite modülünü incelemiştir. Silis dumanının katılması ile statik elastisite modülü üzerinde % 9'luk bir artış sağlandığını belirtmiştir. Silis dumanının, bu çalışmadaki etkilerine benzer etkiler yaptığı, Chandra ve Berntsson (2002), Chen and Liu (2004) gibi araştırmacılar tarafından da belirtilmektedir. Bu araştırmacılar, mineral kökenli puzolanların, betonun elastisite modülü üzerinde %10 ile %15 arasında değişen bir artış sağladığını belirtmektedirler. Neville (1994) hafif betonların elastisite modülünün, normal ağırlıklı betonların elastisite modülünün %40 ile %70 ve Anwar Hossain (2004) ise yüksek dayanımlı hafif betonların elastisite modülünün; aynı mukavemete sahip normal agregalı betonların elastisite modülünün %40 ile %80'i arasında değiştiğini belirtmektedirler. Bu çalışmada ise 28 günlük doymuş kuru yüzey numunelerin elastisite modülü TS EN 206-1'e göre aynı dayanım sınıfına sahip 28 günlük normal ağırlıklı kuru yüzey doymuş halde kırılan betonların elastisite modülünün % 41-48' i, 28 günlük etüv kurusu numunelerin elastisite modülü değerleri ise 28 günlük normal ağırlıklı betonların elastisite modülünün %32-35' i arasında değer aldığı görülmüştür.

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında üretilen taşıyıcı hafif betonların taze ve sertleşmiş haldeki deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

7.1 Karışım Seçimi ile İlgili Yapılan Deney Sonuçları

Çalışmada pomza agregasının yanında kullanılacak malzemelerin seçimi amacıyla birçok ön deney yapılmıştır. İlk olarak sadece pomza agregası kullanılarak hafif betonlar dökülmüştür. Dökülen bu hafif betonların 28 günlük basınç mukavemeti değerleri 15 MPa' ı geçememiştir. Bunun üzerine % 15 oranında 15-25 cm boyutunda normal agrega ile 0-5 cm boyutunda kırma kum, pomza agregası ile yer değiştirilerek hafif betonlar üretilmiştir. Bu betonların 28 günlük basınç mukavemeti sonuçları ise 20 MPa' ın biraz üstüne çıkmıştır; fakat birim hacim ağırlık değerini artırdığı için bu karışımda kullanılmamıştır.

Çalışmanın bir diğer kısmında % 10 oranında silis dumanı Portland çimentosu ile yer değiştirilerek kullanılmış ve birim hacim ağırlığı 1900 kg/m³ civarında 28 günlük basınç mukavemeti değeri 23 MPa olan hafif betonlar elde edilmiştir. Yine sadece uçucu kül kullanılarak dökülen hafif betonlarda incelenmiş ve bunlarında silis dumanı ile beraber kullanılmadan 20 MPa' ı geçemeyeceği gözlenmiştir. Bütün bu ön deneyler sonucunda bütün karışımlarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun yanında %10 oranında silis dumanı kullanılmıştır.

7.2 Taze Beton Deney Sonuçları

Akışkanlaştırıcı katkı kullanılmadan yapılan deneylerde sıfır çökme bulunmuştur. Hafif beton üretiminde belirli bir kıvamı sağlamak için akışkanlaştırıcı katkı kullanmanın zorunlu olduğu görülmüştür. Aynı işlenebilirlik koşulları altında, uçucu kül katkılı HB-U betonu daha düşük birim hacim ağırlık değeri göstermiştir. Bunu

yüksek fırın cüruf katkılı beton, daha sonrada sadece silis dumanı katkılı HB betonu izlemiştir. İşlenebilirlik ve betonun kalıplara yerleştirilmesi açısından en iyi sonucu uçucu kül katkılı HB-U betonu göstermiştir. Perdah sırasında sadece silis dumanı katkılı HB betonu, diğer HB-U ve HB-Y betonlarına göre biraz zorluk göstermiştir.

Gözlemsel olarak yapılan incelemede HB-U betonunun priz alma süresinin diğer betonlara göre biraz fazla zaman aldığı görülmüştür. Bu nedenle ertesi gün kalıptan çıkarılan numunelerde zedelenme olmaması için HB-U betonuna uygulanan hassasiyet diğer betonlara göre daha çok olmuştur. Ayrıca HB-U betonun rengi diğer betonlara göre daha koyu, yüksek fırın cürufu katkılı betonun ki ise açık griye yakın olarak gözlenmiştir.

7.3 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Silis dumanının, uçucu külün ve yüksek fırın cürufunun beton yapımında uygun bir katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için sahip olması gereken dayanım aktivite indeksi, ASTM standardına göre minimum değer üzerinde olduğu görülmüştür.

Buhar kürü uygulamasında HB ve HB-U betonları 7 günlük KYD halde kırılan numune sonuçları ile paralellik göstermiştir. Ancak 10 saat – 80 °C uygulanan buhar kürü uygulaması yüksek fırın cürufu katkılı HB-Y betonu için yeterli olmamıştır ve bu bizim hedeflediğimiz 20 MPa'ın altında değer vermiştir.

HB-U numunelerin kuru yüzey doygun ve etüv kurusu birim ağırlıkları, HB ve HB-Y numunelerinden daha düşük çıkmıştır. Dökülen tüm betonlarda 1900 kg/ m³, ün altında bir birim hacim ağırlık sonucu elde edilmiştir. Etüv kurusu durumlarında % 14-19 arasında bir birim ağırlık kaybı gözlenmiştir.

7, 28 ve 56. günlerde, kuru yüzey doygun ve etüv kurusu hallerinde en düşük basınç dayanımını, % 20 uçucu kül katkılı HB-U betonu vermiştir. En yüksek dayanımı ise HB betonu sergilemiştir. Üretilen betonların kuru yüzey doygun halde 28 günlük silindir basınç dayanımı sınıfı TS EN 206-1'e göre HB betonu için hemen

hemen LC 30/33 iken, HB-U ve HB-Y betonları LC 25/28 bulunmuştur. Etüv kurusu durumunda ise HB ve HB-Y betonları LC 30/33 sınıfına girerken, HB-U betonu LC 25/28 beton sınıfına girmiştir.

10/20cm boyutundaki 28 günlük KYD haldeki silindir numunenin 7,5cm ayrıtlı küp numuneye oranı HB, HB-U ve HB-Y betonları için sırası ile 0,94, 0,99 ve 0,98 iken, etüv kurusu numunelerde ise 10/20cm boyutundaki 28 günlük silindir numunenin 7,5cm ayrıtlı küp numuneye oranı HB, HB-U ve HB-Y betonları için sırası ile 0,89, 0,91 ve 0,90 bulunmuştur.

7 günlük kuru yüzey doygun haldeki silindir numunelerde, 7 günlük etüv kurusu silindir numunelere göre % 16-18 oranında dayanım kaybı gözlenmiştir. Küp numunelerde bu oran % 18-24 arasında kalmıştır. 56. günde ise bu oranların % 1 lere kadar düştüğü kaydedilmiştir. Yani ilerleyen yaşlarda KYD ve etüv kurusu hallerde numuneler arasındaki dayanım farkı kapanmıştır. Kuru yüzey doygun halde silindir numuneler 7. günde 28 günlük basınç dayanımının ortalama %74-%79' unu kazanırken, etüv kurusu durumunda %89- %93'ünü kazanmıştır. Küp numunelerde buna paralel dayanım değerleri göstermiştir. Uçucu kül katkılı HB-U betonunun erken yaştaki dayanımı ile ilerleyen yaşlardaki dayanımı arasındaki fark diğer betonlara göre biraz daha fazla olmuştur. 7 günlük silindir numunelerin KYD/etüv kurusu basınç dayanım oranları ortalama 0,83 iken, 28. günde bu oran ortalama 0,95-0,98 arası ve 56. günde ise ortalama 0,99 olmuştur. Yaş ilerledikçe fark kapanmıştır.

Betonların silindir (10*20cm) basınç dayanımları ile küp (7,5cm) basınç dayanımları arasındaki korelasyon katsayısı R^2 etüv kurusu numuneler için 0.88~0.99 arasında değerler alırken, kuru yüzey doygun durumdaki numuneler için 0.94~0.99 arasında değerler almıştır.

Eğilme dayanımlarına bakacak olursak; 7.günde KYD halde HB betonu en yüksek değeri verirken, 28. günde HB-Y betonu HB betonunu yakalamakta ve 56. günde ise HB ve HB-U betonu eşit değerler verirken yüksek fırın cürufu katkılı HB-

Y betonu en yüksek değeri vermiştir. Etüv kurusu durumunda ise HB-Y betonu her yaşta en yüksek dayanımı göstermiştir.

Yarmada çekme dayanımında ise KYD ve etüv kurusu durumlarında HB ve HB-Y betonları her yaşta yaklaşık aynı değerleri verirken, uçucu kül katkılı HB-U betonu bunların gerisinde kalmıştır.

Eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımları arasında, KYD ve etüv kurusu durumlarında aralarında korelasyon ilişkisi kurulmuştur. HB ve HB-U betonlarında korelasyon katsayısı ortalama $(R^2) \sim 0.99$ iken, HB-Y betonunda bu değer $(R^2) \sim 0.90$ bulunmuştur. En iyi ilişkiyi HB ve HB-U betonları göstermiştir.

28 günlük KYD ve etüv kurusu numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, normal betonda 0,002 civarında olan birim deformasyonun hafif betonda 0,003 civarında ve hatta bunu geçtiği gözlenmiştir. Ayrıca gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin, gerilmenin yaklaşık %85-90' ına kadar lineer olarak devam ettiği görülmüştür. Elde edilen bu sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. Kuru haldeki numunelerde kopma anında oluşan kuyruk, KYD haldeki numunelere göre biraz fazla olmuştur.

28. günde DKY halde betonların elastisite modülleri 12,500-14,500 MPa arasında değer almıştır. En yüksek değeri HB betonu göstermiştir. Etüv kurusu durumunda ise elastisite modülü değerleri üç numune tipinde de 10,000 MPa civarında değer almıştır. 56. günde KYD halde elastisite modülü değerleri basınç dayanımına paralel olarak artış göstermiştir ve KYD halde elastisite modülü değerleri 14,000-15,500 MPa arasında değer almıştır. En yüksek değeri HB betonu verirken en düşük değeri HB-U betonu vermiştir. 56. günde etüv kurusu durumunda ise elastisite modülü değerleri ortalama olarak 7,200 MPa gibi oldukça düşük bir değer göstermiştir. ACI 318 ve BS 8110' a göre teorik olarak elde edilen elastisite modülü sonuçları ile deneysel yolla elde edilen elastisite modülü sonuçları karşılaştırıldığında doymun kuru yüzey numunelerde ortalama farkın % 20' lere olduğu ve sadece 56 günlük etüv kurusu numunelerde bu farkın % 50' lere ulaştığı gözlenmiştir.

Öneriler

Pomza agregası boşluklu ve su emme kapasitesi fazla olduğu için beton tasarım hesabı yapılmadan evvel bu agreganın fiziksel özellikleri iyice araştırılmalı, ön deneyler birkaç kez tekrarlanmalıdır. Daha sonra buna göre beton karışım hesabı yapılmalıdır. Taze betonun kalıba yerleştirilmesi ve kalıptan alınmasına gösterilen önem, normal betona göre daha çok olmalıdır.

Bu çalışmada taşıyıcı hafif betonun mekanik özellikleri incelenmiştir. İkinci bir çalışma olarak bu betonun kalıcılık (durabilite) özellikleri incelenmelidir. Bu sonuçlar ışığında yapıda kullanılmasına karar verilmelidir.

Uçucu kül gibi mineral katkıların kullanılması betonun maliyetini düşüreceği gibi, çevrenin korunması aşamasında da büyük katkı sağlayacaktır. Yüksek fırın cürufunun hem maliyet hemde hidratasyona olan katkısı düşünüldüğünde çimento ile yerdeğiştirmesi avantaj sağlayacaktır. Silis dumanının ise çimentoya göre oldukça pahalı olmasına rağmen, dayanıma olan etkisi düşünüldüğünde % 10 silis dumanı kullanımının gerekli olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

ACI Committee 213R-87 (1999). *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, American Concrete Institute, ACI.

ACI Committee 213R-03 (2003). *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, American Concrete Institute, ACI.

ACI Committee 213R (1999). *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, American Concrete Institute, ACI.

Akçaözoğlu, K. (2007). *Silis Dumanı İçeren Yüksek Dayanımlı Harçlarda Numune Boy Değişiminin Basınç Dayanımı ve Birim Kısalma Üzerindeki Etkisi*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.

Akçaözoğlu, S. (2008). *Atık Pet Şişe Kırıklarının Hafif Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Al-Khaiat, H. & Haque, M.N. (1998). Effect Of Initial Curing on Early Strength and Physical Properties of a Lightweight Concrete, *Cement and Concrete Research*, 28, 6. p. 859–866.

Anwar Hossain, K.M. (2004). Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 283-291p.

Arslan, M.E. (2007). *Eğilmede Taşıyıcı Hafif Beton-Donatı Aderansının Geleneksel Beton-Donatı Aderansıyla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Aruntaş, H. Y. (2006). *Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli*, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 21, No 1, 203 s.

ASTM C 311. (2007). *Standard Test Methods For Sampling And Testing Fly Ash Or Natural Pozzolans For Use In Portland-Cement Concrete*. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 618. (1994). *Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete*. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 989. (1994). *Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars*. Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 1240. (2005). *Standard Specification For Silica Fume Used In Cementitious Mixtures*. American Society for Testing and Materials Standart. USA.

Ateş, E. (2000). *Styropor Hafif Betonun ve Betonarme Çatı Plak Elemanları Üzerine Araştırma*, Bitirme Ödevi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi.

Atiş, C.D. (1997). *Design and Properties of High Volume Fly Ash Concrete for Pavements*. The University of Leeds, PhD. Thesis, Leeds, U.K., 342p.

Atiş, C. D., Tartıcı, H., Sevim, U. K., Özcan, F., Akçaözoğlu, K. & Yüzgeç, C. (2002). Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Beton Katkısı Olarak Kullanılabilirliği. 5 *Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi*, ACE, İTÜ, İstanbul, Türkiye, pp.161-168.

Balendran, R.V., Zhou, F.P., Nadeem, A., & Leung, A.Y.T. (2002). Influence of Steel Fibres on Strength and Ductility of Normal and Lightweight High Stength. *Pergamon, Building and Environment* (37), 1361-1367p .

- Bentur, A., Bonen, D. & Goldman, A. (1993). Discussion of a Paper by Chong, X. Roll of Silica Fume in Compressive Strength of Cement Paste, *Mortar and Concrete*. ACI Material Journal, pp.376.
- Bhanja, S. & Sengupta, B. (2005). Investigations On The Tensile Strength Of High Performance Concrete Incorporating Silica Fume. *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18)* Beijing, China, August 7-12.
- Bilim, C. (2006). *Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği*. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bremner, T.W. & Holm, T.A., (1995). *High Performance Lightweight Concrete Areview*. ACI SP-154, 750, 1-19p.
- Brooks, J. J., Wainwright, P. J. & Boukendakji, M. (1992). *Influence of Slag type and Replacement Level on Strength, Elasticity, Shrinkage and Creep of Concrete. Proceedings, CANMET/ACI Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-132, v 2, Editor V.M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, İstanbul, pp.1325-1341.
- BS 8110, (1997). "*Structural use of Concrete Part 1. Code of Practice for Design and Construction.*", London: British Standard Institution.
- Chandra, S., & Berntsson L. (2002) *Lightweight Aggregate Concrete*. New York, USA : Noyes Publications.
- Chen, B. & Liu, J. (2004). Contribution of Hybrid Fibers on The Properties of High Strength Lightweight Concrete Having Good Workability. *Science and Direct-Cement and Concrete Research*, 35, 913-917p.

- Chen B. & Liub J.(2005). Contribution of Hybrid Fibers on the Properties of the High-Strength Lightweight Concrete Having Good Workability, *Cement and Concrete Research*, 35 p. 913–917.
- Chi J.M., Huang R., Yang C.C. & Chang J.J., (2003). Effect of Aggregate Properties on the Strength and Stiffness of Lightweight Concrete, *Cement & Concrete Composites*, 25 p.197–205.
- Çağlayan, M. & Kahriman, A. (2003). Alternatif Beton Agregası Olarak Pomza ve Kent Mobilyalarında Kullanılabilirliği, *III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul 7s.
- Çark, A. & Sümer, M. (1996). Değişik Kür Şartlarında Silis Dumanı Kullanımının Betonun Mukavemetine Etkisi. *Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar*, 4. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, s.267-277.
- Demir, İ. (2009). Aynı Oranlarda İkame Edilen Silis Dumanı ve Uçucu Külün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Int.J.Eng.Research & Int.J.Eng.Research & Development*, Vol.1,No.2,June development, Vol.1,No.2,June.
- Dinçer, R., & Çağatay. İ., H. (2004). *Pomza ile Yapılan Hafif Betonların Mekanik Özellikleri*, Çukurova Üniversitesi. Müh.Mim.Fak.Dergisi, Cilt 19. Sayı 2. Aralık 14 s.
- Doğulu, S. (1998). *Effect of Fineness of Ground Granulated Blast-Furnace Slags on Their Cementitious Properties*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Durmuş, A., Arslaner M., Hüsem M. & Kolaylı H. (1996). *Karadeniz Bölgesi Hafif Agregata Yataklarının Belirlenmesi ve Bunların Yekpare ve Prefabriğe Beton Yapılarda Kullanılabilirlik ve Yararlarının Araştırılması*. Araştırma Projesi Raporu, KTÜ Mühendislik-Mimarlık Fak. İnşaat Müh., 91.112.001.5, Trabzon.

- Erdoğan, Y.T. (2003). *Beton*. 1. Baskı, Ankara : ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- Erdoğan, T.Y. (2007). *Beton*. 2. Baskı: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- EuroLightCon. (1998). *LWAC material properties state-of-the-art*, Document BE96- 3942/R2, December, ss. 12-13.
- Faust, T. (1997). Stress Strain Curves of High Strength Lightweight Concrete. *Institut für Massivbau und Baustofftechnologie*, Universität Leipzig, Lacer No: 2.
- Faust. T. & Gert König, E.H. (1997). *Stres-Strain Curves of High Strength Lightweight Concrete*. LACER, 2, 103-109p.
- Fernandez, L. & Malhotra, V.M., (1990). Mechanical Properties, Abrasion Resistance and Chloride Permeability of Concrete Incorporating Granulated Blast-Furnace Slag. *Cement, Concrete and Aggregates*, v 12, No.2, pp.87- 100.
- Founie, A. (2005). Pumice and Pumicite, *U.S. Geology Survey, Mineral Commodity Summaries*, USA.
- Gündüz L., Sarıışık A., Tozaçan B., Davraz M., Uğur İ. & Çankıran O. (1998). *Pomza Teknolojisi (Pomza Karakterizasyonu)*. Cilt I, Temmuz -Isparta.
- Gündüz, L. & Ugur. I. (2005). The Effects Of Different Fine And Coarse Pumice Aggregate/Cement Ratios On The Structural Concrete Properties Without Using Any Admixtures, *An International Journal of Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue 9, September, pp1859-1864.

- Güngör N., & Tombul, M. (1997). Pomzanın Kullanım Alanı ile İlgili Özellikleri ve Mevzuatın Pomza Madenciliğine Etkisi. *I. Isparta Pomza Sempozyumu*, 26-28 Haziran -Isparta.
- Haque, M.N., Al-Khaiat, H., & Kayali, O. (2004). Strength and durability of lightweight concrete, *Cement & Concrete Composites* 26, 307-314.
- Hüsem, M. (1995). *Doğu Karadeniz Bölgesi Doğal Hafif Agregalarından Biriyle Yapılan Hafif Betonun Geleneksel Bir Betonla Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi*. Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hüsem, M. (2003). The effects of bond strengths between lightweight and ordinary aggregate-mortar, aggregate-cement paste on the mechanical properties of concrete. *Materials Science and Engineering* 363, 152-158.
- Jahren, P. (1993). *Use of Silica Fume in Concrete*. ACI Sp Publication SP-79, Detroit, s.625-645.
- Kadiroğlu, İ. (2004). *Kendiliğinden Yerleşen Normal Dayanımlı Hafif Beton Üzerine Deneysel Bir Çalışma*. Batıçim Batı Anadolu Çimento Sanayii A.Ş. İzmir.
- Karahan, O. (2006) . *Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kayali O., Haque M.N., & Zhu B. (2003). Some Characteristics of High Strength Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete, *Cement & Concrete Composites*, 25 p.207–213.
- Khayat, K.H., & Aıtcın, P.C., (1992). *Silica Fume in Concrete: an Overview*. ACI Sp Publication S132, Detroit, pp.835-872.

- Koca, C. (1996). Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Curuf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı. 4. *Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.381-394.
- Koçkal, N.U. (2008). Effects of Lightweight Fly Ash Aggregate Properties on the Performance of Lightweight Concretes. Doktora Tezi. Boğaziçi Üniversitesi.
- Kok, S. C., & Min-Hong, Z. (2002). Water Permeability and Chloride Penetrability of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete, *Cement and Concrete Research*, No 32, pp. 639-645.
- Konuk, H., Özyurt, N., Taşdemir, C., Yüceer, Z., & Sönmez, R. (2002). Hafif Betonların Taşıyıcılık Özellikleri. 1. *Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi*, İstanbul.
- Lee, I. (2002). *Complete Stres-Strain Characteristic of High Performance Concrete*. New Jersey Institute of Technology, PhD. Thesis, New Jersey, 119p.
- Malhotra, V.M. (1997). *Mineral Admixtures*. Concrete Construction Engineering Handbook, Nawy Edward G. CRC Press, New York, pp.27-36.
- Neville, A.M. (1995). *Properties of Concrete*, Addison Wesley Longman Limited, England.
- Newman, J., & Choo, B. S. (2003). *Advanced Concrete Technology*. Constituent Materials, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Onaran, K. (1991). *Malzeme Bilimi*, İ.T.Ü :Matbaası Gümüşsuyu, İstanbul.
- Önal G., Özpeker I., Yüce A.E., & Güney A. (1999). *Endüstriyel Mineraller Envanteri*. İstanbul Maden İhracatçıları Birliği. İstanbul.

- Öner, A., & Akyüz, S. (2007). An Experimental Study on Optimum Usage of GGBS for the Compressive Strength of Concrete. *Cement and Concrete Composites*, pp.505-514.
- Özturan, T. (1991). Beton Üretiminde Uçucu Kül Kullanımının İrdelenmesi. *TMMOB Türkiye İnşaat Mühendisliği XI. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, I. Cilt*, İstanbul : Kardeşler matbaacılık
- Postacıoğlu, B. (1975).Yapı Malzemesi. İstanbul : İTÜ Matbaası Gümüssuyu.
- Ramyar, K., (1993). *Effects of Turkish Fly Ashes on the Portland Cement-Fly Ash Systems*. METU, In Civil Engineering, PhD. Thesis, Ankara, 208p.
- Sari, D., & Paşamehmetoğlu, A.G. (2005). The Effects of Gradation and Admixture on the Pumice Lightweight Aggregate Concrete. *Cement And Concrete Research*, No. 35(5), 936-942.
- Siddique, R. (2004). A. Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash and San Fibers. *Cement and Concrete Research*, 34:37-42.
- Soroka, I. (1993). Concrete in Hot Environments. *National Building Research Institute, Faculty of Civil Engineering, Technion-Israel Institute of Technology*, Haifa, 247p.
- Sönmezoğlu, C. (2005). *Hafif Betonun Mekanik Özellikleri Üzerine Kür Şartlarının Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. Yapı Eğitim Anabilim Dalı.
- Sümer, M. (1994). Uçucu Kül Atıklarının Beton Üretiminde Değerlendirilmesi, *I. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu, Salihli, Bildiriler Kitabı*, 179-185.
- Taşdemir, M. A. (1982). *Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları*, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.

- Taşdemir, C. (1996). Mikrofiller Malzemelerin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. *4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.199-208.
- Tokyay, M., & Erdoğan, K. (1997). *Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar. Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Raporu*, Tçmb, Ankara, 31s.
- Tokyay, M., & Erdoğan, K. (1998). *Türkiye’de Üretilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu*, TÇMB/AR-GE/Y 98.2, ISBN:, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara 1998, 70 s.
- Tokyay, M., & Şatana, O. A., (1997). Hafif Beton Özelliklerine Çimento Miktarının Etkileri. *Çimento ve Beton Dünyası Dergisi*, 2(8), 31-39.
- Tokyay, M. (2003). *Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar. Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu*, TÇMB, Ankara, 47s.
- Topçu, İ.B., & Uygunoğlu, T. (2007). Properties Of Autoclaved Lightweight Aggregate Concrete. *Building and Environment* 42, 4108-4116.
- Topçu, İ.B. (1997). *Semi Lightweight Concretes Produced By Volcanic Slags*. Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 1, USA, pp. 15- 21.
- TS EN 206-1. (2002). *Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk*. Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 197-1. (2002). *Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2. (2010). *Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) Deneyi*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 12390-3. (2010). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5 (2010). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6. (2010). *Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 2511. (1977). *Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 639. (1975). *Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Turan, G. (2010). *Uçucu Kül ve Silis Dumanı Kullanımının Taşıyıcı Hafif Betonun Bazı Mekanik Özelliklerine Olan Etkisi*. Bitirme Projesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Fakültesi.
- Ulus, İ. (2007). *Ham Perlit Agregası Kullanılarak Yüksek Dayanımlı Hafif Beton Üretilebilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Uyan, M. (1975). *Beton ve Harçarda Kılcallık Olayı*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi.
- Uygunoğlu, T. (2008). *Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Uzbaş, B. (2008). *Çimento Esaslı Malzemelerin Tek Eksenli Yük Altındaki Davranışının Mezo Düzey Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ünal, O., & Uygunoğlu, T. (2004). *Soma Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi*, Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak.
- Wainwright, P.J. (1986). Properties of Fresh and hardened Concrete Incorporating Slag cements. *Cement Replacement Materials*. (Editor R.N. Swamy), Surrey University Press, pp.100-133.
- Wainwright, P.J., & Ait-Aider, H. (1995). The Influence of cement Source and Slag Additions on the Bleeding of Concrete. *Cement and Concrete research*, v 25, n 7, pp.1445-1456.
- Yaşar, E., Atış, D.C., Kiliç, A., & Gülsen H. (2003). Strength Properties Of Lightweight Concrete Made With Basaltic Pumice And Fly Ash. *Materials Letters* Vol. 57, No. 15, 2267-2270.
- Yazıcıoğlu, S., & Bozkurt, N. (2006). Pomza Taşı ile Elde Edilen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt* 21, No 4, 675-680.
- Yeğinobalı A. (1993). Silis Dumanının Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildirileri*, Ankara, s.149-167.
- Yeau, K. Y., & Kim, E. K. (2005). An Experimental Study on Corrosion Resistance of Concrete with Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Cement and Concrete Research*, v 35, pp.1391-1399.

Yun, B., Ratiyah, I., & Basheer, PAM. (2004). Properties Of Lightweight Concrete Manufactured With Fly Ash, Furnace Bottom Ash And Lytag, *International Workshop On Sustainable Development And Concrete Technology*, 77-78 , Beijing.