

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UÇUCU KÜLLERİNDEN HAFİF AGREGA
ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ceren BURSA

Ocak, 2017

İZMİR

UÇUCU KÜLLERİNDEN HAFİF AGREGA ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Cevher Hazırlama Programı**

Ceren BURSA

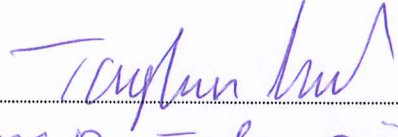
**Ocak, 2017
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

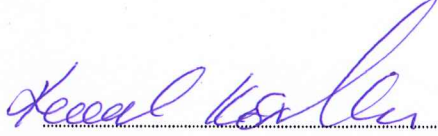
CEREN BURSA, tarafından **PROF. DR. MEHMET TANRIVERDİ** yönetiminde hazırlanan “**UÇUCU KÜLLERİNDEN HAFİF AGREGA ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Mehmet TANRIVERDİ

Yönetici


Doç. Dr. Tayfun ÇİÇEK

Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. Kemal KÖSEOPLU

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Emine İlknur CÖCEN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimi hazırlarken yaptığım deneyler ve araştırmalar sırasında benden desteğini esirgemeyen, her zaman anlayış gösteren, bilgi ve görüşlerinden yararlandığım danışmanlarım, Sayın Prof. Dr. Mehmet TANRIVERDİ ve Sayın Doç. Dr. Tayfun ÇİÇEK' e, laboratuvarlarını kullanmama olanak tanıyan Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Serdar AYDIN' a, çalışmalarında bana yardımcı olan Teknisyen Fatih BÜYÜKTOPÇU' ya ve projemin bir kısmında beraber yol aldığımız lisans öğrencisi Giray ÖNEL' e teşekkürlerimi borç bilirim. Bütün eğitim hayatım boyunca gösterdikleri anlayış ve yardımları ile birlikte maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme içtenlikle teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca bana sonsuz güvenen, güç kaynağım olan ve geçtiğimiz Şubat ayında kaybettiğim Babam Osman BURSA' yı rahmetle anıyorum.

Ceren BURSA

UÇUCU KÜLLERİNDEN HAFİF AGREGA ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Bu çalışma kapsamında, Seyitömer Termik Santrali uçucu küllerinden hafif agregası ve hafif beton üretilmesi planlanmıştır. Uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenip, beş farklı oranda kireç ve alçı karışımları deneyerek çeşitli peletler (hafif agregalar) üretilmiştir. Üretilen hafif agregalar üzerinde deneysel çalışmalar yapılarak, oluşan fazlar araştırılarak, en dayanıklı hafif agregaların yüzde 88 uçucu kül, yüzde 6 kireç ve yüzde 6 alçı karışımı ile oluşturduğu saptanmıştır. Elde edilen bu hafif agregalar ile değişik oranlarda portland çimentosu karışımı (yüzde 16, yüzde 20, yüzde 24) kullanılarak 3 farklı hafif beton üretilmiştir. Üretilen hafif betonların farklı yaşlarda (1, 3, 7, 14 ve 28) mekanik özellikleri incelenmiştir. Mekanik özelliklerden basınç dayanımı ve eğilme dayanımı araştırılmıştır. Numunelerin birim hacim ağırlık değerleri tüm numunelerde 2 ton bölü metre küpün altında olduğu gözlemlenmiştir. Mekanik deneylere göre yüzde 20 çimento katkılı hafif betonun daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Uçucu kül, hafif agregası, hafif beton

INVESTIGATION OF LIGHT AGGREGATE PRODUCTION BY FLY ASH

ABSTRACT

In this study, it has been planned to produce lightweight aggregate and lightweight concrete from fly ash of Seyitomer Thermal Power Plant. After the specified physical and chemical properties of fly ash, it has been produced various pellets from lime and plaster which mix of five different rates. The formed phase have been discovered with experimantal study and the most durable pellets were found to consist of fly ash (88 percent), lime(6 percent) and plaster (6 percent) mixture. Mixing different rates of Portland cement (16 percent, 20 percent, 24 percent) with the lightweight aggregates obtained, three types of lightweight cement have been produced. The concretes have been subjected to several mechanical tests for certain durations of time (1, 3, 7, 14 and 28 days). Compressive strength and flexural tensile strength have been investigated in mechanical tests. In the whole samples, the unit weight values have remained below 2 ton- meter cubes. According to the mechanical tests, the lightweight concrete with 20 percent cement has been found to be much more durable.

Keywords: Fly ash, lightweight aggregate, lightweight concrete

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ.....	xii
BÖLÜM BİR-GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ-GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Uçucu Kül	3
2.1.1 Uçucu Külün Tanımı	3
2.1.2 Uçucu Küllerin Özellikleri	4
2.1.2.1 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	4
2.1.2.2 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri	4
2.1.2.3 Uçucu Küllerin Mineralojik Özellikleri.....	5
2.1.2.4 Uçucu Küllerin Puzolanik Özelliği.....	7
2.1.3 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması.....	8
2.1.4 Uçucu Küllerin İnşaat Alanında Kullanımı	9
2.1.5 Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkisi.....	10
2.1.5.1 Betonların İşlenebilirliği	10
2.1.5.2 Betonların Priz süresi	11
2.1.5.3 Betonların Su İhtiyacı	11
2.1.5.4 Betonların Hidratasyon Isısı	11
2.1.5.5 Betonların Basınç ve Çekme Dayanımı	12
2.1.5.6 Dayanıklılık.....	12
2.2 Hafif Agrega.....	13

2.3 Hafif Beton.....	14
2.3.1 Hafif Betonun Tanımı.....	14
2.3.2 Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Hafif Agregalar.....	14
2.3.3 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları	15
2.3.4 Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	16
2.3.4.1 Hafif Betonun İşlenebilirliği	16
2.3.4.2 Hafif Betonun Su Emmesi	17
2.3.4.3 Hafif Betonun Birim Hacim Ağırlığı	17
2.3.4.4 Hafif Betonun Dayanımı.....	18
2.3.4.5 Hafif Betonun Isı İletkenliği	20
2.4 Çimentolarda Uçucu Kül Kullanımı	20
2.5 Agregada Olarak Uçucu Kül Kullanımı.....	21
2.6 Betonlarda Uçucu Kül Kullanımı.....	22
 BÖLÜM ÜÇ-TÜRKİYE’DEKİ TERMİK SANTRALLER VE SEYİTÖMER	
TERMİK SANTRALİ HAKKINDA BİLGİ	24
3.1 Türkiye’deki Termik Santraller.....	24
3.2 Seyitömer Termik Santrali	25
3.2.1 Seyitömer Termik Santrali Hakkında Genel Bilgiler	25
3.2.2 Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külünün Özellikleri	26
3.2.2.1 Fiziksel Özellikleri.....	26
3.2.2.2 Kimyasal Özellikleri	27
3.2.2.3 Mineralojik Özellikleri.....	27
3.2.2.4 Morfolojik Özellikleri.....	27
 BÖLÜM DÖRT-KAYNAK ÖZETLERİ.....	29
 BÖLÜM BEŞ-DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	32
5.1 Amaç	32
5.2 Kapsam.....	32

5.3 Malzeme	33
5.3.1 Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külü	33
5.3.1.1 Numune Alma	33
5.3.1.2 Numune Hazırlama	33
5.3.2 Sönmüş Toz Kireç	34
5.3.3 Yapı Alçısı	34
5.3.4 Çimento	35
5.4 Metot ve Test Yöntemleri	35
5.4.1 Malzeme Karakterizasyonu	36
5.4.1.1 Kimyasal Analiz Yöntemleri	36
5.4.1.1.1 Kızdırma Kaybı Analizi	36
5.4.1.1.2 Sülfür Analizi	37
5.4.1.1.3 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO, MgO, Na_2O , K_2O , TiO_2 ve MnO Analizi	37
5.4.1.2 Mineralojik Analiz Yöntemleri	37
5.4.2 Deneysel Çalışmalarda Uygulanan Test Yöntemleri	38
5.4.2.1 Peletleme Testi	38
5.4.2.1.1 Nem Tayini	39
5.4.2.1.2 Tane Boyutuna Göre Yaş Dayanım Testleri	40
5.4.2.2 Kür Kabini Testleri	41
5.4.2.2.1 Pelet Dayanım Testleri	42
5.4.2.2.2 XRD Testleri	42
5.4.2.2.3 Su Emme Testleri	42
5.4.2.2.4 Pelet Yoğunluk Testleri	42
5.4.2.2.5 SEM Analizi	43
5.4.2.3 Hafif Beton Testleri	44
5.4.2.3.1 Basınç Dayanımı Testleri	45
5.4.2.3.2 Eğilme Dayanımı Testleri	48
BÖLÜM ALTI-BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	51
6.1 Fiziksel Karakterizasyon Sonuçları	51
6.1.1 Seyitömer Uçucu Külü Elek Analizi Sonuçları	51

6.1.2 Seyitömer Uçucu Külü Kimyasal Analizi Sonuçları	52
6.1.3 Seyitömer Uçucu Külü Mineralojik Analizi Sonuçları	54
6.2 Peletleme (Hafif Agregası) Testi Sonuçları	54
6.2.1 Hafif Agregaların Nem Tayini Testi Sonuçları	54
6.2.2 Hafif Agregaların Düşme ve Yaş Dayanım Testleri Sonuçları	55
6.2.3 Hafif Agregaların Basınç Dayanımı Testi Sonuçları	55
6.2.4 Hafif Agregaların XRD Analizi Sonuçları	58
6.2.5 Hafif Agregaların SEM Analizi Sonuçları	60
6.2.6 Hafif Agregaların Su Emme Testi Sonuçları	62
6.2.7 Hafif Agregaların Yoğunluk Testi Sonuçları	62
6.3 Hafif Beton Testi Sonuçları	62
BÖLÜM YEDİ-SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	70

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 F sınıfı uçucu külün SEM’ deki görüntüsü.....	6
Şekil 2.2 Hafif ve normal betonda gerilme dağılımlarının gösterimi.....	19
Şekil 3.1 Kömürle çalışan termik santraller.....	25
Şekil 3.2 Seyitömer termik santrali uçucu külü SEM görüntüsü.....	28
Şekil 5.1 Seyitömer uçucu külü.....	33
Şekil 5.2 Sönmüş kirecin tane boyut dağılımı.....	34
Şekil 5.3 Deneysel çalışmalar akım şeması.....	36
Şekil 5.4 Rigaku marka XRD analiz cihazı.....	38
Şekil 5.5 Peletleme tavası ve hafif agregalar.....	39
Şekil 5.6 Nem tayini için kullanılan peletler.....	40
Şekil 5.7 Chatillon & Sons marka dayanım test cihazı.....	41
Şekil 5.8 Nuve TK 252 kür kabini ve peletler.....	41
Şekil 5.9 5 tonluk pres.....	42
Şekil 5.10 Micromeritics AccuPyc II 1340 yoğunluk cihazı.....	43
Şekil 5.11 Joel marka SEM analiz cihazı.....	44
Şekil 5.12 Hafif agrega, uçucu kül ve çimento karışımı.....	45
Şekil 5.13 Hafif beton karışımının kalıplara doldurulması.....	46
Şekil 5.14 300 Ton kapasiteli hidrolik pres.....	47
Şekil 5.15 Numunenin prese yerleştirilmesi.....	47
Şekil 5.16 Hafif beton karışımının kalıplara doldurulması.....	48
Şekil 5.17 Eğilme dayanımı testi teorik gösterimi.....	49
Şekil 5.18 Numunenin prese yerleştirilmesi.....	49
Şekil 6.1 Seyitömer uçucu külünün elek altı-elek üstü grafikleri.....	52
Şekil 6.2 Seyitömer termik santrali uçucu külü X-Işınları difraktogramı.....	54
Şekil 6.3 % 12 kireç katkılı hafif agregaların düşme testi sonuçları.....	55
Şekil 6.4 % 12 kireç katkılı hafif agregaların yaş dayanım testi sonuçları.....	55
Şekil 6.5 Hafif agregalarının basınç dayanım testi sonuçlarının karşılaştırılması.....	57
Şekil 6.6 Hafif agregaların XRD sonuçları.....	59
Şekil 6.7 A) 2000x büyütmede Seyitömer uçucu külünün görüntüsü, B) 2000x büyütmede % 0 alçı içerikli numunenin görüntüsü.....	60

Şekil 6.8 A) 2000x büyütmede % 2 alçı içerikli numunenin görüntüsü, B) 2000x büyütmede % 4 alçı içerikli numunenin görüntüsü.....	60
Şekil 6.9 A) 2000x büyütmede % 6 alçı içerikli numunenin görüntüsü, B) 2000x büyütmede % 8 alçı içerikli numunenin görüntüsü.....	61
Şekil 6.10 A) 2000x büyütmede % 0 alçı içerikli hafif agreganın görüntüsü, B) 2000x büyütmede % 6 alçı içerikli hafif agreganın görüntüsü.....	61
Şekil 6.11 Hafif betonların basınç dayanım testi sonuçlarının karşılaştırılması.....	63
Şekil 6.12 Hafif beton numunesinin kesiti.....	64
Şekil 6.13 Hafif betonların eğilme dayanım testi sonuçlarının karşılaştırılması.....	65
Şekil 6.14 Hafif beton numunesinin eğilme dayanımı testi sonrası kırılma yüzeyi.....	65



TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Uçucu küllerin genel özellikleri.....	4
Tablo 2.2 Türkiye’deki bazı UK’lerin mineralojik kompozisyonları.....	7
Tablo 2.3 Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanlar.....	9
Tablo 2.4 Hafif betonun yoğunluğa göre sınıflandırılması.....	18
Tablo 2.5 Hafif betonların basınç dayanımları ile çimento arasındaki bağıntı.....	19
Tablo 2.6 Hafif betonların basınç dayanımı sınıfları.....	20
Tablo 3.1 Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller.....	24
Tablo 3.2 Uçucu külün elek altı değeri ve yoğunluk ölçümleri.....	26
Tablo 5.1 Yapı alçısının kimyasal analizi.....	34
Tablo 5.2 Tip 1 42,5 R çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	35
Tablo 5.3 Peletlerin karışım oranları.....	38
Tablo 5.4 Peletleme şartları.....	39
Tablo 5.5 Peletlerin elek analizi.....	44
Tablo 5.6 Test türleri ve kullanılan numune tipi ve sayısı.....	45
Tablo 5.7 Tek eksenli basınç dayanım testi ve eğilme dayanım testi için numune miktarları.....	46
Tablo 6.1 Seyitömer uçucu külü elek analizi sonuçları.....	51
Tablo 6.2 Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları.....	53
Tablo 6.3 Seyitömer uçucu külünün standart uygunluk sınırları.....	53
Tablo 6.4 Kireç ve alçı katkılı hafif agregaların basınç dayanım testi sonuçları.....	56
Tablo 6.5 Hafif betonların tek eksenli basınç dayanım testi sonuçları.....	63
Tablo 6.6 Hafif betonların eğilme dayanım testi sonuçları.....	64

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Dünyada termik santrallerin atığı olan uçucu kül, depolama sorunları nedeniyle, hava ve suları kirleterek çevreye büyük zararlar vermektedir. Bugün dünyada ortaya çıkabilecek uçucu kül miktarı, yılda 650 milyon ton civarındadır. Fakat, bu kadar büyük bir üretime karşın uçucu küllerin çok az bir kısmı inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Birçok ülkede uçucu küllerin büyük bir kısmının kullanılmadan kalması, uçucu külün hafif agrega üretiminde değerlendirilmesinin bu miktarın azaltılabilmesinde ne kadar önemli olduğunu göstermektedir (Koçkal, 2007).

Ülkemizde yıllık uçucu kül üretimi, ortalama 15 milyon ton olan ve listenin başında Çayırhan, Soma, Orhaneli, Afşin –Elbistan, Kangal, Yatağan Kemerköy, Seyitömer, Tunçbilek, Çatalağzı ve Yeniköy santralleri bulunan 38 termik santral bulunmaktadır. Yıllık üretim miktarının yıldan yıla değişmesi doğalgaz santrallerinin faaliyete girmesine bağlıdır. Ülkemizin enerji üretiminde dışa bağımlılığını bitirmek, endüstrinin diğer bölümlerinde kullanılmayan az kalorili linyit kömürlerinin termik santrallerde kullanılması ile mümkündür (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği [TÇMB], 2009).

Çoğunlukla doğal veya yapay çeşitli hafif agrega kullanımıyla üretilen hafif betonların inşaat sektöründe çok yönlü kullanımı gittikçe önem kazanmaktadır. Yapıların hafifletilerek depreme dayanıklılıklarının artırılması, yapı kullanım alanının artırılması, mesnet açıklıklarının büyütülmesi ve izolasyon özelliklerinin geliştirilmesi bazı örnek uygulama alanlarıdır. Uçucu kül kullanılarak hafif agrega üretimi son yıllarda yoğun olarak araştırılmakta ve bazı ticari ürünler de geliştirilmektedir. Hafif agregaların sinterleme yoluyla özelliklerinin iyileştirilmesi de çeşitli araştırma ve uygulamalara konu olmaktadır. Bu meyanda uçucu külün diğer yapay hafif agregalardan üstün yanı, küldeki mevcut karbonun peletlerdeki nemi buharlaştırmak için gerekli sıcaklığı sağlamada ve peletleri sinterleme sıcaklığına taşımada sağladığı kolaylıktır (Koçkal, 2007).

Yapılan çalışmalarda cürufta bulunan, % 10-20 arasındaki yanmamış karbonun(köbürün), tekrar kazanılıp yakılabileceği, ayrıca tuğla yapımında aranılan özellikte olduğu saptanmıştır. Yapılan araştırmalar, uçucu küllerinde imento, beton, karayolları gibi birçok alanda kullanılabileceğini göstermiştir (Ağar ve Taşdemir, 2007).

Sonuç olarak, uçucu külün birçok sektörde kullanımı ekonomik avantaj sağlamakla birlikte artığın kazanımı ile çevreye olan etkisi azaltılmaktadır.

Çalışmada, Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilen uçucu kül ile hafif agrega ve hafif beton üretimi hedeflenmiştir. Bu hedef kapsamında üç farklı oranda kireç ve alçı karışımları denenerek çeşitli peletler (hafif agregalar) üretilmiştir. Üretilen hafif agregalar üzerinde deneysel çalışmalar yapılmış olup en dayanıklı hafif agregalar ile hafif beton üretilmiştir. Deneyler sonucunda ise hedeflenmiş olan birim hacim ağırlığı 2000 kg/m³ ten küçük hafif betonlar elde edilmiştir.

BÖLÜM İKİ

GENEL BİLGİLER

2.1 Uçucu Kül

2.1.1 Uçucu Külün Tanımı

Uçucu kül (UK), termik santrallerde pulvarize kömürün yanması sonucu oluşan baca gazlarına tutunarak siklon veya elektro filtreler ile toplanan son derece önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu oluşan erimiş malzeme soğuduktan sonra küresel şekilli kül tanelerine dönüşmektedir. Bu kül taneleri yaklaşık 0,5-150 mikron arasındadır. Baca gazlarındaki sürüklenmelerinden dolayı uçucu kül adını almaktadırlar.

Uçucu külün içerisinde bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO dır. Bileşenlerin miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO , SO_3 , alkali oksitler de uçucu küllerin içerisinde bulunmaktadır. Bu bileşenlerin farklı oranlardaki bileşimi uçucu küllerin tipini karakterize etmektedir.

Uçucu kül üretimini; santral tipi, işletim biçimi, yakılan kömürün cinsi, yanma biçimi gibi çeşitli faktörler etkilemekle birlikte genel olarak elektrik enerjisi üreten termik santrallerde kullanılan taşkömürünün % 10-15'ini, linyit kömürünün ise % 20-50'si kül olarak ortaya çıkmaktadır. Yanma sonucu ortaya çıkan külün % 75-85'i baca gazları ile kazandan çıkar ve bu atıklar "uçucu kül" olarak tanımlanırlar. Santrallerde, baca gazlarından uçucu küllerin tutulması amacıyla genel olarak yüksek verimli elektro filtreler kullanılmaktadır (TÇMB, 2009).

Uçucu külün fiziksel, kimyasal, mineralojik ve puzolanik özelliklerinin en belirgin ortak yanı, bunların yöreden yöreye, hatta aynı yörede dahi değişkenlik göstermeleridir.

Bu değişkenlik;

- Uçucu külün kaynağının oluşturan kömürün türü ve değişkenliğine,
- Kömürün yakılmadan önceki öğütülme (pulvarizasyon) derecesine,

- Kazan türüne,
- Yakma sıcaklığı ve diğer işletme parametrelerine,
- Kül toplama ve uzaklaştırma sistemlerinin özellikleri ve işleyişine,
- Çevre korunması amacıyla kömüre ilave edilen katkı maddeleri gibi faktörlerden ve faktörlerin de zamana göre değişebilmelerinden kaynaklanan özelliklere bağlıdır (Güler ve ark., 2005).

2.1.2 Uçucu Küllerin Özellikleri

2.1.2.1 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri, kömür termik santralde yakıldığı zaman kömürün kimyasal özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Uçucu kül, gri renkte olup içindeki C miktarı arttıkça daha koyu bir renk almaktadır. Uçucu kül, % 60-90 camsı bileşen içeren çok ince taneciklerden oluşmaktadır.

Tane şekli yuvarlak olan uçucu küllerin çapları 1-200 μm arasındadır. Uçucu küllerin yoğunluğu, 2,2 – 2,7 g/cm^3 civarındadır. Uçucu küllerin özgül yüzeyi, çimento inceliğine yakındır ve öğütme yapılmadan kullanılabilmektedir. Uçucu küllerin genel özellikleri Tablo 2.1’ de verilmiştir (Aruntaş, 2006).

Tablo 2.1 Uçucu küllerin genel özellikleri (Aruntaş, 2006)

Çap (μm)	Şekil	Renk	Yoğunluk (g/cm^3)	Boyutu
1-200	Küresel	Gri	2,2-2,7	Çimento inceliğinde

2.1.2.2 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

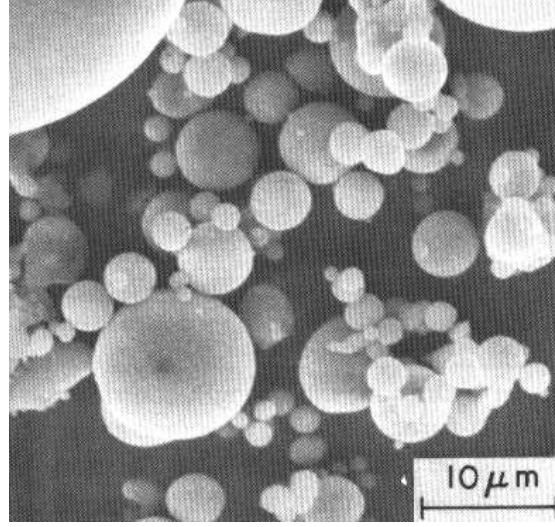
Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orjini ve proses koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfirizasyon gibi) bağlıdır.

Uçucu küllerde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı, % 70 değerinden yüksek olup ASTM C 618 standartındaki şartı sağlamaktadır. Yakılan kömürün cinsine göre bazı uçucu küller yüksek oranda CaO içermektedir. CaO miktarı % 10' un altında ise uçucu küller, düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu olarak %10' un üstünde olanlar ise yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. ASTM C 618 standartına göre uçucu küller, S+A+F toplamı % 70'in üzerinde ise F sınıfı uçucu kül, S+A+F toplamı % 50'nin üzerinde ise C sınıfı uçucu kül grubuna girmektedir (Aruntaş, 2006).

Kızdırma kaybı, % 1,0-10 arasında değişen, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozulması ile meydana gelen bağlanmamış su veya CO_2 kaybı olarak bilinmektedir.

2.1.2.3 Uçucu Küllerin Mineralojik Özellikleri

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden ziyade mineralojik yapıları ile bağlantılıdır. Düşük kireçli uçucu küllerin ana aktif bileşeni, silis ve aluminadan oluşmuş amorf ya da camsı fazdır. Bu özellikteki uçucu küller, nemli ortamda sönmüş kireç (CaOH_2) ile reaksiyona girdiklerinden dolayı puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise, puzolanik özellik göstermelerinin yanı sıra sahip oldukları serbest kireç, trikalsiyum aluminat, amorf silis ve alumina vb. sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olmaktadır (Tokyay, 1998). Belirgin özellikli bir F sınıfı uçucu küllerin SEM görüntüsü Şekil 2.1' de verilmiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi uçucu kül taneleri, küresel şekillidir.



Şekil 2.1 F sınıfı uçucu külün SEM’ deki görüntüsü (Aruntaş, 2006)

Mineralojik ve kimyasal özellikler açısından uçucu küller, içi boşluklu ve boşluksuz, camsal kürecikler süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden oluşur. Kimyasal yapılarında temel element olarak Si, Al, Ca ve S bulunur. Uçucu küllerin matrisi esas olarak alümina silikatlardan ve bunlarla birlikte bulunabilen Fe, Mg, Na, K, Ca, Ti ve nadir toprak elementlerinden oluşur. Uçucu olan veya uçucu oksitleri oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn gibi elementler matrise girme eğilimi göstermezler. Bu elementler derişimleri tane boyutu ile ters orantılı olarak uçucu küllerin yüzeyinde toplanırlar (Güler ve ark., 2005).

Düşük kireçli uçucu küllerdeki camsı faz miktarı, yüksek kireçli uçucu küllere göre daha çoktur. Düşük kireçli uçucu küllerde mineral faz olarak; camsı faz, kuvars (SiO_2), mullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4) vb. bulunmaktadır. Yüksek kireçli uçucu küllerde ise ek olarak serbest kireç (CaO), anhidrit(CaSO_4), gehlenit, feldspat, trikalsiyum aluminat ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), plajiyoklaz, gibi kalsiyum silikatlar bulunmaktadır. Türkiye’deki bazı UK’lerin mineralojik kompozisyonları Tablo 2.2’de verilmiştir (Tokyay, 1993).

Tablo 2.2 Türkiye’deki bazı UK’lerin mineralojik kompozisyonları (Tokay, 1993).

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

2.1.2.4 Uçucu Küllerin Puzolanik Özelliği

Puzolanlar, kendileri hidrolik bağlayıcı olmamalarına karşın ince olarak öğütüldüklerinde nemli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksille reaksiyona girerek bağlayıcı özellikte bileşenler oluşturan doğal veya yapay malzemelerdir.

Puzolanlar, gerek çimento yapımı sırasında klinkerle birlikte öğütülerek gerekse şantiyede çimentoya yapının özelliğine göre değişik oranlarda katılarak beton yapımında kullanılmaktadır. Diğer bir deyimle puzolanlı çimentolara, hataları düzeltilmiş portland çimentoları denilebilir.

Uçucu küller de puzolanik özellikleri nedeni ile puzolan olarak kullanılabilen malzemelerdendir. Ancak, çimento veya klinkere katılacak puzolanların belirli bir özellikte olması gerekmektedir. Bu özellikler TS-639 ve TS-640'da verilmiştir (Güler ve ark., 2005).

Uçucu külde puzolanik özelliğin çok yavaş ortaya çıktığı unutulmamalıdır. Uçucu kül, kireç ve kum karışımına dayanım kazanması için en az 2-3 gün geçmesi gerekmektedir. Oda sıcaklığında iyi bir dayanım elde etmek için ise en az 2-3 yıl beklemek gerekecektir. Uçucu külsüz kireç kum karışımı ise 2-3 günlük bir bekleme

sonucunda sıfır dayanım gösterir. Sıcaklık ve incelik tepkime hızını olumlu yönde etkiler (Ağar, 2007).

2.1.3 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır (TÇMB, 2009).

ASTM C 618 standartlarına göre uçucu küller F ve C sınıfları olarak ayrılmaktadırlar;

- Toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 70' ten fazla olan ve bitümlü kömürden üretilen uçucu küller F sınıfına girmektedir. Ek olarak bu küllerde CaO oranı % 10' un altında olduğundan dolayı düşük kireçli olarak da isimlendirilir. F sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler.
- Toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı % 50' den fazla ise ve linyit, yarı bitümlü kömürden üretiliyorsa C sınıfı uçucu kül olarak adlandırılır. Ayrıca C sınıfı uçucu küllerde CaO oranı % 10' dan yüksek olduğundan bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da bilinmektedir. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe ek olarak bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

TS EN 197-1 standartına göre uçucu küller silisli (V) ve kalkersi (W) olarak iki sınıfa ayrılmaktadır.

- V sınıfı uçucu küller, büyük bir bölümü puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelmiş ince bir toz olan ve reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) yüzdesi % 10' dan düşük, reaktif silis miktarının ise % 25' ten yüksek olması gerekmektedir.
- W sınıfı küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir tozdur. Asıl reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan; geri kalanı demir

oksit (Fe_2O_3) ve diğ er bileş enleri ihtiva eden küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç oranının % 10' dan fazla olması ve reaktif silis miktarının da % 25'den fazla olması gerekmektedir.

2.1.4 Uçucu Küllerin İnşaat Alanında Kullanımı

Türkiye’de uçucu külün üretimi ve sektörlerde kullanımı 1960’ lı yıllarda başlamıştır. Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri incelendiğinde uçucu küllerin inşaat sektöründe rahatlıkla kullanılabileceğ i, malzeme ve enerji üretiminde ekonomik açıdan katkı sağ lanırken diğ er taraftan da çevre kirliliğ inin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunması da mümkündür (Ünal ve Uygunoğ lu, 2004). İnşaat sektöründe uçucu kül; agrega, beton, çimento, gaz beton, kerpiç, tuğ la ve yalıtım malzemesi üretiminde, baraj ve yol yapımında kullanılmaktadır. Türkiye ve Dünyada uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığ ı alanlar Tablo 2.3’ te verilmiştir. Türkiye’de uçucu kül genellikle çimento ve tuğ la üretimi ile baraj yapımında kullanılmaktadır. Avrupa’da ise uçucu kül genel olarak beton, hafif beton blok ve gaz beton üretiminde verimli bir şekilde kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006).

Tablo 2.3 Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığ ı alanlar (Aruntaş, 2006).

Malzeme	Kullanım amacı ve yeri
Çimento	Hammadde, katkı ve ikame malzemesi olarak
Agrega	İnce agrega, iri agrega ve hafif agrega olarak
Beton	Katkı ve ikame malzemesi olarak
Tuğ la, ateş tuğ lası	Katkı malzemesi olarak
Kerpiç	Bağ layıcı malzeme olarak
Yapı malzemeleri	Blok, panel, duvar, gaz beton, beton boru, cam, boya, seramik, plastik, harç
Çeş itli yapılar / uygulamalar	Baraj, otoyol, nükleer santral, geoteknik uygulamalar

2.1.5 Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkisi

Katkı maddesi olarak kullanılan uçucu kül, taze ve sertleşmiş beton özelliklerini değiştirmektedir. Karışım suyu, hidratasyon ısı, işlenebilirlik, priz süresi, terleme, dayanım, sülfata dayanıklılık, alkali agrega reaksiyonu ve betonun ekonomikliğı gibi özellikler bulunmaktadır. Uçucu külün taze ve sert betona olumlu ve olumsuz etkileri şöyledir;

Uçucu Külün Betonlara Olumlu Etkileri

- İşlenebilirliğı olumlu etkilemektedir.
- Su kusmayı azaltmaktadır.
- Uzun süre dayanım artışı sağlamaktadır.
- Ekonomikliğı sağlamaktadır.
- Hidratasyon ısısında düşmeyi gerçekleştirmektedir (Dikici, 2010).

Uçucu Külün Betonlara Olumsuz Etkileri

- İlk yaşlarda betonların dayanımları düşüktür.
- Uzun süre kürlenmeye ihtiyaç duyulmaktadır.
- Beton prizlenmesinde gecikme yaşanmaktadır (Dikici, 2010).

2.1.5.1 Betonların İşlenebilirliğı

Uçucu küllü betonların katkısız betonlara göre daha iyi işlenebilme özelliğı vardır. Bunun iki sebebi şöyledir;

1-) Uçucu külün yoğunluğu portland çimentosunun yoğunluğundan daha düşüktür. Bu sebeple, puzolan katkılı beton yapımı için çimento miktarının bir bölümü yerine uçucu kül kullanıldığında, betondaki bağlayıcı hamurun hacmi yükselmektedir. Daha büyük hacme sahip bağlayıcı hamur, taze betondaki agregaların arasını daha verimli doldurmakta ve böylece plastiklik sağlanmaktadır.

2-) Uçucu kül taneleri küresel şekilli olup küresel şekilli tanecikler iç sürtünmeyi azaltarak, betonun akıcılığını arttırmaktadır. Betondaki bağlayıcı hamurun hacmindeki

bu artış uçucu kül taneciklerinin arasındaki sürtünmeyi azaltarak betona daha fazla akıcılık sağlamaktadır. Ek olarak, taze betonun pompalanabilirliğini arttırmakta, yüzeyinin daha kolay düzeltilebilir olmasını sağlamakta, kalıpları daha kolay sökülebilir hale getirmektedir (Erdoğan, 2007).

2.1.5.2 Betonların Priz süresi

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

2.1.5.3 Betonların Su İhtiyacı

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

2.1.5.4 Betonların Hidratasyon Isısı

Uçucu kül içeren betonlarda daha az portland çimentosu olduğundan, bu karışımlarla üretilen betonların hidratasyon ısıları, katkısız betonunkinden daha az olmaktadır.

2.1.5.5 Betonların Basınç ve Çekme Dayanımı

Katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmasının beton dayanımına etkileri, ince taneli doğal puzolanların etkisi ile benzerlik göstermektedir. Normal şartlarda, 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 göre daha yavaş olduğundan uçucu küllü betonlarda ilk yaştaki mukavemetler daha düşük olmaktadır. C sınıfı uçucu küllerin ilk yaşlardaki mukavemet kazanma hızları daha yüksektir. Uçucu küllü betonlarda en iyi sonuçların genellikle % 15-25 arası uçucu kül oranlarında alındığı, C sınıfı uçucu küllerle bu oranın % 35'e kadar çıkabileceği belirtilmektedir. Daha yüksek uçucu kül oranları genellikle kütle betonlarında hidratasyon ısını düşürmek ve çatlamayı azaltmak için kullanılmaktadır (Özturan, 1991).

Atış ve ark. (2002), uçucu küllü betonların basınç ve yarmada çekme dayanımları üzerinde yaptıkları araştırmalarında, uçucu külün ağırlıkça %10-20 oranlarında çimento yerine kullanılmasıyla üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımlarının şahit betonlar ile aynı ya da daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu kül içeren beton numunelerin basınç ve çekme dayanımları arasındaki ilişkinin normal betona benzediği saptanmıştır.

2.1.5.6 Dayanıklılık

Uçucu küllü betonların su geçirimsizliği, katkısız betonlara göre daha az olmakla birlikte ince taneli mineral katkıların kullanılması taze betondaki terlemeyi azaltmaktadır. Böylece terlemeden dolayı betonda oluşacak boşluklar azalmaktadır. Ayrıca, mineral katkıların içindeki silika ile çimentonun hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksit reaksiyona girerek C-S-H jellerini oluşturmaktadır. Böylece çimento hamurunun içindeki jel miktarı artmakta, kapiler boşluk oranı azalmaktadır (Erdoğan, 2003).

Puzolanik katkı maddeleriyle üretilen betonlarda daha az portland çimentosu yer aldığından uçucu küllü betonların sülfatlara dayanıklılığı katkısız betonlara oranla daha fazla olacaktır. Sülfat reaksiyonuna yol açabilecek C_3A miktarı daha az olmaktadır. Ek olarak, puzolan katkılı betonlardaki hidratasyon, önce portland çimentosu ile su arasında başlamaktadır. Puzolanların reaksiyon göstermeleri ancak ve ancak C_3S ve C_2S ana bileşenlerinin hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksit kullanımlarına bağlıdır. 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 çok karbonatlaşma görüldüğünü ve uçucu kül katkı oranı arttıkça karbonatlaşma derinliğinin de arttığını belirtmiştir.

2.2 Hafif Agregalar

Beton üretiminde kullanılan, kum, çakıl, kırmataş gibi malzemelerin genel adı agregadır. Beton içinde hacimsel olarak % 60-75 civarında yer işgal eden agregalar önemli bir bileşendir. Agregalar tane boyutlarına göre ince ve kaba agregalar olarak ikiye ayrılır. Beton yapımında kullanılan en pahalı malzeme çimentodur. Agregalar ise ucuz bir malzemedir. Bu nedenle istenilen kalitedeki betonda mümkün olduğu kadar fazla agregalar kullanmak maliyeti düşürmektedir. Özgül ağırlıkları $2,4 \text{ g/cm}^3$ ten küçük olanlara hafif agregalar denir. Genleştirilmiş kil, bims ve perlit bu sınıftadır. Bu agregalarla üretilen betonlara hafif beton denir. Uçucu küller çimento üretiminde ve beton katkı maddesi olarak kullanılabilir. $1100-1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ' ye kadar pişirilirse, yuvarlak taneli agregalar elde edilebilmektedir. Bu taneler hafif beton yapımında kullanılır (Türkiye Hazır Beton Birliği [THBB], 2016).

İri agregalar olarak hafif agreganın, ince agregalar olarak da doğal kum veya hafif agregalar kırıntılarının, normal çimento ile birlikte kullanıldığı betonlara ya da birim ağırlığı normal betonlardan belirgin şekilde küçük olan betonlara hafif beton adı verilmektedir.

Hafif betonda kullanılan agregaların başında pomza, perlit, volkanik tuf ve cüruflar gelmektedir. Hafif beton uygulamalarında diğer bir yöntem ise öğütülmüş silisli agrega ve çimento ile hazırlanan karışıma, gözenek oluşturuvcu bir madde eklenmesi şeklinde olmaktadır. Çeşitli hafif beton uygulamaları günümüzde sıkça kullanılmaktadır.

Hafif betonlar yapı malzemelerinde istenilen özellikler olarak bilinen düşük birim hacim ağırlığı, yüksek ısı ve ses izolasyonu, iklimlendirme özellikleri, deprem yüklerini daha az almaları, yangına karşı yüksek dirençleri ve ekonomik olmaları gibi üstünlüklerinden dolayı inşaat ve yapı endüstrisinde geniş kullanım alanı bulmaktadırlar (Topçu ve Kara, 2009).

2.3 Hafif Beton

2.3.1 Hafif Betonun Tanımı

TS EN 206-1 standartına göre hafif beton, etüv kurusu durumdaki birim hacim ağırlığı 800 kg/m^3 ' ten büyük, 2000 kg/m^3 ' ten küçük olan beton olarak tanımlanmaktadır. Hafif beton, yapımında kullanılan agreganın bir kısmı veya tamamı farklı tip ve özelliklere sahip hafif agregaların kullanılmasıyla da üretilebilmektedir.

ACI 213R-03 standartında taşıyıcı hafif betonlar, hava kurusu birim hacim ağırlığı $1120\text{-}1960 \text{ kg/m}^3$ arasında olan ve bununla birlikte 28 günlük basınç mukavemeti 17 MPa ' ı geçen beton olarak tanımlanmaktadır.

TS 2511 standartına göre de, karakteristik basınç dayanımı 16 MPa ' dan daha yüksek çıkan ve havada kurumuş haldeki birim hacim ağırlığı da en fazla 1900 kg/m^3 olan hafif agregalı betonlar taşıyıcı hafif beton olarak sınıflandırılmaktadır.

2.3.2 Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Hafif Agregalar

Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agreganın amacı, hafif agrega kullanımı ile birim hacim ağırlığı istenen aralıklarda tutmaktır. Hafif beton üretiminde kullanılan

hafif agregalar üretildikleri malzemenin hammaddesine ve kendi birim hacim ağırlıklarına göre sınıflandırılmaktadır. Üretildikleri malzemenin kaynağına göre hafif agregalar dört sınıfta toplanabilir (Ateş, 2000).

- **Doğal Hafif Agregalar:** Pomza taşı, volkanik tuf, volkanik cüruf.
- **Doğal Malzemeden 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 (Dikici, 2010).

2.3.3 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları

Hafif betonun günümüz beton teknolojisine sağlamış olduğu bazı avantajlar ve dezavantajlar bulunmaktadır.

Hafif betonun avantajları

- Yapı ağırlığının azalmasına bağlı olarak düşey yüklerde azalmalar olmaktadır ve bununla beraber yapıyı etkileyen atalet kuvvetleri de azalmaktadır. Böylece deprem yapıya daha az zarar vermektedir.
- Hafif betonla üretilen yapı elemanlarının birim ağırlıklarının düşük seyretmesi sebebiyle yapıdaki ölü yükler azalmaktadır. Böylece temelleri ve diğer yapı elemanlarını daha küçük boyutlarda tasarlamak ve inşa etmek mümkün olmaktadır.
- Eğilme etkisindeki elemanlarda ekonomik uygunluğu sağlamaktadır.
- Geçici taşıyıcılar ile mesnet ve temeller gibi daimi taşıyıcı elemanlarda ekonomiyi sağlamaktadır.
- Isı iletkenlik katsayılarının diğer betonlara nazaran daha düşük olması sebebiyle ısı ve ses izolasyonu daha iyi olmaktadır.
- Hafifliği nedeniyle taşınması ve yerleştirilmesi kolay olmaktadır.

- Homojen bir özellik göstermektedirler.
- Yangına karşı oldukça dayanıklıdır (Dikici, 2010).

Hafif betonun dezavantajları

- İçinde poroziteleri olması nedeniyle basınç dayanımları düşük ve aşınmaya karşı dayanıksız olmaktadır.
- Sünme ve rötre değerleri normal betona nazaran daha yüksektir.
- Normal betona kıyasla daha çok çimento dozajı gerektirmektedir. Bu sebeple maliyet artışı olmaktadır.
- Normal betona göre daha düşük bir kesme-kayma dayanımına sahip olmaktadır.
- Hafif agrega bulmak güç olduğu için ek masraf gerekmektedir.
- İmalat ve yerine konması daha kaliteli ve usta işçilik gerektirmektedir. Daha çok emek ve maliyet istemektedir.
- Elastisite modülünün düşük olmasından dolayı taşıyıcı hafif betonlu kirişlerde, dönmeler daha yüksek olmaktadır (Dikici, 2010).

2.3.4 Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

2.3.4.1 Hafif Betonun İşlenebilirliği

Hafif agregalı betonun mekaniksel davranışı normal betondan biraz daha değişiktir. Özellikle aynı çökme değerindeki hafif agregalı beton normal betona göre daha iyi işlenebilirlik göstermektedir. Aynı şekilde, hafif agregalı betonun sıkıştırma faktörü, betonu sıkıştıran yerçekimi kuvveti yoğunluk düştükçe azaldığından, işlenebilirliği olduğundan daha düşük değer almaktadır (Neville, 1995).

Yüksek çökme ve aşırı titreşim ayrışmaya sebep olabilir. Hafif iri agrega taneleri yüzeye doğru çıkar. ACI 213R-03 iyi bir yüzey elde etmek için çökme değerini 125 mm ile sınırlandırmıştır. Daha düşük çökme değeri ile ayrışma önlenmektedir (ACI 213R-03)

2.3.4.2 Hafif Betonun Su Emmesi

Suyun, tanelerdeki boşluklara nüfuz ederek emilmesi sebebiyle, etüvde kurutulmuş agrega numunesinin veya beton numunesinin kütlesinde meydana gelen artışa su emme denir. Betonun gözeneklerini dolduran su, betonun mekanik ve termik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği gözlemlendiği için betonların az su emmesi istenmektedir. Betonun su emmesi, hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregaların su emme kapasitesine ve agrega/çimento oranına kıyasla değişmektedir. Hafif agregalı betonların üretimlerinde kullanılan agregaların gözenekli yapılarına orantılı olarak hafif betonların da su emmelerinin yüksek olduğu görülmektedir. Agregaların gözenek yapısı da hafif betonun su emme oranına paralel olarak etki etmektedir. Farklı agregalarla üretilen fakat aynı agrega oranında olarak üretilen betonların su emme oranları da mevcut agregaların gözenek yapısından dolayı farklılık yaratmaktadır. Örneğin diatomit gibi yüksek gözenekli agregayla, pomza gibi yarı açık gözenekli agregayı karşılaştırsak, diatomitteki su emme oranının pomzadan daha fazla olduğu gözlenmektedir (Topçu ve Uygunoğlu, 2007).

Hafif ve normal betonlarda dayanıklılık açısından kılcal su emme oranı da oldukça önemlidir. Yüksek kılcal su emme miktarı direk olarak harç, agrega çimento ara yüzeyindeki veya agregadaki kılcal boşluklar tarafından emilen su olup gene olarak betonun porozitesinden bağımsızdır. Direkt olarak kılcal boşluklarla ilgilidir (Uyan, 1975).

2.3.4.3 Hafif Betonun Birim Hacim Ağırlığı

Hafif agregalı betonların yoğunluğu, betonların üretiminde kullanılan hammaddelerin özelliklerine, en çok da agreganın yoğunluğuna bağlıdır. Aynı malzemeden üretilmiş bile olsalar, farklı üretim teknikleri kullanılarak betonların dayanım ve yoğunlukları değiştirilebilmektedir (Uygunoğlu, 2008). Hafif betonun yoğunluğu, agregaların tane dağılımına, su-bağlayıcı oranına, agregaların nem içeriğine, çimento dozajına, karışım oranına, kimyasal ve mineral katkı maddelerine bağlıdır. Ayrıca, betonun yerleştirme ve sıkıştırma yöntemine ve kür koşullarına da bağlılık göstermektedir.

TS EN 206-1 standartına göre hafif betonların yoğunluğu D 1,0 ile D 2,0 arasında sınıflandırılmaktadır. Yoğunluk sınıfına bağlı olarak yoğunluğun 800 kg/m^3 ten az ve 2000 kg/m^3 ten fazla olmaması gerekmektedir. Tablo 2.4' te TS EN 206-1' e göre hafif betonun yoğunluğa göre sınıflandırılması gösterilmiştir.

Tablo 2.4 Hafif betonun yoğunluğa göre sınıflandırılması (TS EN 206-1, 2002)

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

2.3.4.4 Hafif Betonun Dayanımı

Yaklaşık beton dayanımları elde etmek için hafif agregalı karışımın çimento dozajı normal betona nazaran daha fazla olmaktadır. Yüksek dayanım gösteren hafif betonlarda ilave çimento dozajı % 50 yi aşabilmektedir. Daha yüksek oranlardaki çimento içeriği, daha düşük su/çimento oranı demektir. Bu yüzden matrisin dayanımı daha yüksek çıkmaktadır. Ek olarak, hafif agregada dayanımları ile bu agregadan yapılan hafif betonların dayanımı arasında genel bir ilişki bulunmamaktadır (Neville, 1995).

Hafif agregalı betonlardaki dayanım artışı, hafif betonlarda kullanılan agregaların birim hacim ağırlığıyla orantılıdır. Başka bir deyişle, hafif agreganın yoğunluğu arttıkça hafif betonun dayanımı da artmaktadır (Uygunoğlu, 2008).

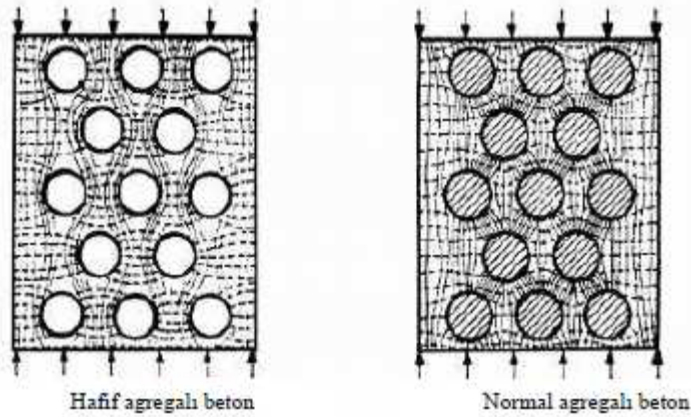
Tablo 2.5' te ACI 213R-87 standartına göre hafif agregalı betonun basınç dayanımı ve çimento içeriği arasındaki bağıntı verilmiştir. İstenen basınç dayanımları arttıkça çimento dozajlarının da artması gerekmektedir. Örnek verilecek olursa, 28 MPa dayanım için ortalama 350 kg/m^3 bağlayıcı gerekmektedir. Normal betondaki gibi

silika dumanı hafif agregalı betonun dayanımını arttırmaktadır. Diğer bağlayıcı malzemeler de hafif agregalı betonlarda kullanılabilir.

Tablo 2.5 Hafif betonların basınç dayanımları ile çimento arasındaki bağıntı(ACI 213R, 2003)

Standart Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	Çimento Dozajı (kg/m ³)	
	Hafif İnce Agregalı	Normal İnce 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 yaklaşık dayanımları hamur dayanımından daha düşük olduğu için, gelen kuvvet çimento harcı sayesinde taşınmaktadır. Ardından, hafif agregalar ile aktarılmaktadır (Hüsem, 2003). Bu nedenle kırılma, hafif betona uygulanan yüke paralel olarak düz çizgiler şeklinde oluşmaktadır (Şekil 2.2).



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

Normal agregalı betonlarda ise bu durum biraz daha farklıdır. Normal agregaların dayanımı harç dayanımından çok daha yüksek olduğu için beton üzerine gelen kuvvet agregalar tarafından taşınarak çimento harcı tarafından aktarılmaktadır. Bu sebeple basınç kuvveti altındaki bir beton numunede oluşan gerilmeler, numunede köşelerden orta kısmına doğru oluşmaktadır.

TS EN 206-1 standartına dayanılarak hafif betonlar basınç dayanımlarına göre Tablo 2.6’ da sınıflandırılmıştır.

Tablo 2.6 Hafif betonların basınç dayanımı sınıfları (TS EN 206-1, 2002)

Basınç Dayanımı Sınıfı	En Düşük Küp Dayanımı, MPa
LC 8/9	9
LC 12/13	13
LC 16/18	18
LC 20/22	22
LC 25/28	28
LC 30/33	33
LC 35/38	38
LC 40/44	44
LC 45/50	50
LC 50/55	55
LC 55/60	60
LC 60/66	66
LC 70/77	77
LC 80/88	88

2.3.4.5 Hafif Betonun Isı İletkenliği

Hafif betonun en belirgin özelliği, daha iyi ısı izolasyonu sağlamasıdır. Bir malzemenin ısı iletkenliği o malzemenin silikat yapısı ile içindeki boşluklarda bulunan havanın ısı iletkenliklerinin toplamıdır (Demir boğa, 1999).

Hafif agregalarla üretilen betonların özellikleri agreganın mineralojik yapısına bileşimine, çimento miktarına, su çimento miktarına ve su çimento oranı gibi birçok faktöre bağlı değişiklik göstermektedir. Sertleşmiş betonların birim ağırlığı, su emmesi, dayanımı ve ısı yalıtımı birbirleri ile bağlantılı olan özellikleridir. (Durmuş, 1996).

2.4 Çimentolarda Uçucu Kül Kullanımı

Çimento endüstrisi, uçucu küllerin inşaat sektöründe yaygın olarak kullanıldığı alanlardan biridir. 1980' li yıllardan beri Türkiye’de katkı çimentoların çimento

üretimindeki oranı, % 90' ları geçmiştir. Uçucu küller çimento üretiminde; hammadde, katkı maddesi ve ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006).

Çimentonun ana hammaddeleri olan kil ve kalker ile karıştırılarak klinker üretiminde uçucu küllerden faydalanılmaktadır. Uçucu küller çimentoda katkı olarak kullanıldığında enerji tasarrufu sağlanmaktadır ve daha ekonomik çimento elde edilmektedir. Türkiye' deki uçucu küller ile yapılan araştırmalarda, Çayırhan, Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Orhaneli, Soma ve Tunçbilek uçucu küllerine ait özgül yüzey değerleri, çimento standartlarında istenen en az 2800 cm²/g değerine eşit ya da istenen değerden büyük olarak bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar, uçucu küllerin öğütme işlemine tabi tutulmadan çimento üretiminde kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca çimento üretimi esnasında çok yüksek miktarda doğal hammadde ve enerji tüketimi yapılmakta ve atmosfere CO₂ gazı yayılımı olmaktadır. Bu da sera etkisi yaratarak iklimsel değişikliklere sebebiyet vermektedir. Bu yüzden çimento üretiminde uçucu kül kullanımının etkisi olarak, enerji tüketiminin azalması ve havadaki CO₂ miktarı da azalacağından küresel ısınmanın minimuma indirilmesi mümkün gözükmemektedir. En önemlisi enerji tasarrufu sağlandığından çimento üretimi maliyetinin de azalması söz konusu olmaktadır (Aruntaş, 2006).

Türkiye'de ve Dünyada uçucu küllü çimentolar ve bu çimentoların özellikleri ile ilgili birçok çalışma vardır. Türkiye'de 1980 yılına kadar çimento üretiminde kullanılan toplam uçucu kül miktarı, yaklaşık olarak 40.000 tondur. Örneğin, İtalya'da elde edilen uçucu küllerin sadece % 1'i çimento üretiminde kullanılırken, Fransa'da 4 milyon ton/yıl civarında uçucu kül üretilmekte ve bunun % 25'i çimento üretiminde kullanılmaktadır. Amerika' da ise üretilen uçucu küllerin yaklaşık % 25'i çimento ve betonda değerlendirilmektedir. Çin'de uçucu kül-kireç karışımları, yaklaşık 50 yıldan beri duvar çimentosu olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Aruntaş, 2006).

2.5 Agrega Olarak Uçucu Kül Kullanımı

Uzun zamandan beri bilinen uçucu küllerin agrega olarak beton ve harç içinde kullanılması, uçucu küllerin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Uçucu

küller, Türk, Amerikan ve İngiliz standartlarında beton ve duvar elemanları için yapay hafif agregalar olarak kabul edilmektedir. Betonda uçucu kül kullanımı; ince agregalar, sinterleme sonrası yapay hafif agregalar ve uçucu kül ile bir miktar portland çimentosu karıştırılarak elde edilen iri hafif agregalar olmak üzere üç şekilde üretilmektedir. Ülkemizde yapılan bir çalışmada, sinterlenmiş uçucu kül hafif agregası üretimi laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş ve bu malzemenin inşaat sektöründe başta agregalar olmak üzere birçok alanda kullanılabileceği önerilmiştir. Sinterlenmiş uçucu kül hafif agregasının geleneksel agregalar yerine betonda içi dolu veya boş blok üretimi için kullanılabileceği ve çok katlı binalarda ölü yükü azaltacağı belirtilmektedir (Aruntaş, 2006).

Uçucu küllerin agregalar üretiminde kullanılması ile ilgili çalışmalar, özellikle son yıllarda önem kazanmıştır. Beton karışımına ince agreganın bir kısmı yerine uçucu kül kullanılarak yapılan araştırmalarda olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Uçucu küllerin ince agreganın bir bölümü yerine kullanılabilirliği onaylanmıştır. Uçucu küllerden elde edilen hafif agregalarla ilgili literatürde birçok çalışma vardır. Yapılan bu çalışmalarda, yüksek sıcaklıkta sinterlenerek yapay iri hafif agregalar olarak üretilen uçucu kül, hafif beton yapımında kullanılmış ve beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Diğer taraftan yüksek oranda uçucu kül ile bir miktar portland çimentosu karıştırılarak elde edilen iri hafif agregaların, hafif beton üretiminde kullanıldığı ve taşıyıcı betonlar elde edildiği görülmektedir. Başka bir çalışmada kil ile birlikte yapay agregalar olarak üretilen uçucu küller betonda, yıkıntı atığı ile birlikte başarıyla kullanılmıştır. Ek olarak, uçucu küllerin bir sıra işlem sonrası beton içinde tekrar kullanılan agregalar olarak kullanıldığı bir araştırmada, doğal agregalar kullanılarak üretilen beton ile atık agregalar içeren betonda benzer sonuçlar elde edilmiştir. İngiltere’de inşa edilen nükleer bir santral inşaatında 1.300 ton sinterlenmiş uçucu kül, hafif agregalar olarak hafif beton içinde kullanıldığı belirtilmiştir (Aruntaş, 2006).

2.6 Betonlarda Uçucu Kül Kullanımı

Uçucu küllerin çimento ile beraber inşaat endüstrisinde çok sık kullanıldığı diğer bir alan, beton üretimidir. Uçucu küllerden, hem normal ve hafif betonda hem de

giderek kullanımı yaygınlaşan hazır beton üretiminde hem katkı hem de ikame malzemesi olarak faydalanılmaktadır. Bunun dışında uçucu küller, ön üretim ve ön gerilmeli beton elemanların üretiminde de kullanılmaktadır. Ayrıca uçucu küllerin, betonda su tutma amacıyla katkı maddesi olarak da kullanılabileceği ön görülmektedir.

Son zamanlarda, Dünyada uçucu küllerin inşaat endüstrisindeki konumu ile ilgili çalışmalar, beton üzerinde yoğunlaşmaktadır. Beton karışımında uçucu küllerden faydalandığında, betonun hem dayanımında hem de dayanıklılığında artışlar elde edilmektedir. Çayırhan ve Soma uçucu küller, çimentonun bir bölümü yerine ikame malzemesi olarak kullanıldığında basınç dayanımı artışı sağlanmıştır. Betonda yüksek oranda uçucu kül kullanılan deneysel bir çalışmada, basınç dayanımı artarken aynı zamanda aşınma dayanımlarının da arttığı görülmüştür. Aynı şekilde hafif betonlarda uçucu küllerin çimento ile karıştırıldığı durumlarda da dayanım artışı elde edilmiştir. Yüksek miktarda C sınıfı uçucu küllerin kullanıldığı bir çalışmada, daha yüksek kalitede ve ekonomik açıdan uygun beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak yapılan deneysel bir araştırma sonucunda uçucu küllerin polimer beton üretiminde de kullanılabileceği tespit edilmiştir. Beton karışımına hafif agrega olarak sinterlenmiş uçucu küllerin eklendiği bir çalışmada, betonarme kirişler üretilmiş ve kirişler üzerinde yapılan deneylerde olumlu sonuçlara varılmıştır. Uçucu küllerin betonarme çeliği üzerinde de olumlu etkileri vardır. Beton karışımında uçucu kül kullanıldığında betonarmede korozyonunun azaldığı deneysel olarak kanıtlanmıştır. Uçucu küllerin kullanıldığı diğer bir beton türü lifli betondur. Araştırmalarda otoklav kullanılan lifli beton üretiminde yüksek oranda uçucu kül kullanılabileceği ön görülmektedir (Aruntaş,2006).

Diğer yandan uçucu küller, Türkiye’de ve Dünyada birçok barajın yapımında betonun hidratasyon ısını düşürmek amacıyla da kullanılmıştır. Amerika’ da 1953 yılında tamamlanmış olan bir barajın betonunda 123.000 ton uçucu kül kullanıldığı belirtilmiştir. Bunun dışında çok sayıda baraj, beton karışımlarına uçucu kül katılarak inşa edilmiştir. İngiltere’de yaklaşık olarak 100.000 ton uçucu külün katkı malzemesi olarak nükleer bir enerji santrali inşaatında kullanıldığı bildirilmektedir (Aruntaş, 2006).

BÖLÜM ÜÇ

TÜRKİYE’DEKİ TERMİK SANTRALLER VE SEYİTÖMER TERMİK SANTRALİ HAKKINDA BİLGİ

3.1 Türkiye’ deki Termik Santraller

Türkiye’de 38 tane termik santral faaliyet göstermektedir (Tablo 3.1). Kömür ve linyit santrallerinin komple kurulu gücü 17.322,30 MW’ dur. 2015 yılında kömür ve linyit santralleri ile birlikte 72.791.886,039 kilovatsaat elektrik üretilmiştir. Elektrik enerjisi üretilen termik santrallerde 60 milyon ton/ yıl düşük kalorili linyit kömürü yakılmaktadır (Enerji Atlası, 2015). Sonuç olarak bacalardan 20 ton/ yıl civarında uçucu kül elde edilmektedir (Şekil 3.1).

Tablo 3.1 Türkiye’ deki kömürle çalışan termik santraller (Enerji Atlası, 2015)

	Santralin Adı	Şehir	Firmalar	Yakıt Tipi	Kurulu Güç
1	Zonguldak Eren	Zonguldak	Eren Enerji	İthal Kömür	2.090 MW
2	Afşin- Elbistan B	Kahramanmaraş	EÜAŞ	Linyit	1.440 MW
3	Afşin- Elbistan A	Kahramanmaraş	EÜAŞ	Linyit	1.355 MW
4	İSKEN Sugözü	Adana	OYAK	İthal Kömür	1.320 MW
5	İskenderun Atlas	Hatay	Diler Holding Enerji	İthal Kömür	1.200 MW
6	İÇDAŞ Bekirli	Çanakkale	İÇDAŞ Elektrik	İthal Kömür	1.200 MW
7	Soma B Termik	Manisa	Konya Şeker Enerji	Linyit	990 MW
8	Yatağan Termik	Muğla	Bereket Enerji	Linyit	630 MW
9	Kemerköy Termik	Muğla	Limak Enerji	Linyit	630 MW
10	Çayırhan Termik	Ankara	Ciner Enerji	Taş Kömürü	620 MW
11	Seyitömer Termik	Kütahya	Çelikler Elektrik	Linyit	630 MW
12	Tufanbeyli Termik	Adana	Enerjisa Elektrik	Linyit	450 MW
13	Kangal Termik	Sivas	Konya Şeker Enerji	Linyit	457 MW
14	Yeniköy Termik	Muğla	İC İtaş Elektrik	Linyit	420 MW
15	Silopi Termik	Şırnak	Ciner Enerji	Asfaltit	405 MW
16	İCDAŞ Biga Elektrik	Çanakkale	İÇDAŞ Elektrik	İthal Kömür	405 MW
17	Tunçbilek Termik	Kütahya	Çelikler Enerji	Linyit	365 MW
18	İzdemir Enerji	İzmir	İzmir Demir Çelik	İthal Kömür	350 MW
19	18 Mart Çan Termik	Çanakkale	EÜAŞ	Linyit	320 MW
20	Çatalağzı Termik	Zonguldak	Bereket Enerji	Taş Kömürü	300 MW
21	Aksa Bolu Göynük	Bolu	Aksa Enerji	Linyit	270 MW
22	İskenderun Demir	Hatay	OYAK	İthal Kömür	220 MW
23	Orhaneli Termik	Bursa	Çelikler Enerji	Linyit	210 MW
24	Çolakoğlu Termik	Kocaeli	Çolakoğlu Metalurji	İthal Kömür	190 MW
25	Yunus Emre Termik	Eskişehir	Naksan Enerji	Linyit	145 MW
26	Polat Termik	Kütahya	Polat Elektrik	Linyit	51 MW

Tablo 3.1 Türkiye’ deki kömürle çalışan termik santraller (devamı)

	Santralin Adı	Şehir	Firmalar	Yakıt Tipi	Kurulu Güç
27	Kardemir Termik	Karabük	Kardemir A.Ş.	Kömür	50 MW
28	Soma A Termik	Manisa	EÜAŞ	Kömür	44 MW
29	Eti Soda	Ankara	Ciner Enerji	Linyit	24 MW
30	Kahramanmaraş	Kahramanmaraş	Kahramanmaraş	İthal Kömür	16 MW
31	Susurluk Şeker	Balıkesir	Türkiye Şeker	Linyit	9,60 MW
32	Amasya Şeker	Amasya	Amasya Şeker A.Ş.	Linyit	7,76 MW
33	Kipaş Kağıt	Kahramanmaraş	Kipaş Holding	İthal Kömür	7,60 MW
34	Aynes Termik	Denizli	Aynes Gıda	Linyit	5,50 MW
35	Küçükler Tekstil	Denizli	Küçükler Tekstil	Linyit	5,00 MW
36	Kütahya Şeker	Kütahya	Kütahya Şeker	Linyit	4,57 MW
37	Çankırı Tuz	Çankırı	Med- Mar Sağlık	Linyit	1,64 MW
38	Göknur Gıda Termik	Niğde	Göknur Gıda	Kömür	1,55 MW



Şekil 3.1 Kömürle çalışan bazı termik santraller (EÜAŞ, 2015)

Bu tez kapsamında Seyitömer Termik Santralinden alınan uçucu kül örnekleri ile çalışmalar yapılmıştır. Seyitömer termik santrali uçucu küllerin genel özellikleri TÇMB’ nin 2009’ da yaptığı çalışmadan alınan bilgilerle açıklanmıştır.

3.2 Seyitömer Termik Santrali

3.2.1 Seyitömer Termik Santrali Hakkında Genel Bilgiler

Seyitömer Termik Santrali Kütahya'nın Tavşanlı ilçesindedir. Seyitömer Termik Santrali, Türkiye’nin sanayi ve yerleşim açısından yoğun elektrik talebi yaratan kuzey

batı bölgesinde, 27 km'lik demiryolu ile Eskişehir-Balıkesir demiryolu hattına bağlıdır. Çelikler enerji firmasına ait santral 600 MW kurulu gücü ile Türkiye'nin 33. Kütahya'nın ise en büyük enerji santralidir. Tesis ayrıca Türkiye'nin 6. büyük Linyit Termik Santrali'dir. Seyitömer Termik Santrali ortalama 3.380.479.091 kilovatsaat elektrik üretimi ile 1.021.293 kişinin günlük hayatında ihtiyaç duyduğu (konut, sanayi, metro ulaşımı, resmi daire, çevre aydınlatması gibi) tüm elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilir. Seyitömer Termik Santrali sadece konut elektrik tüketimi dikkate alındığında ise 1.073.168 konutun elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek elektrik üretimi yapmaktadır.

Kütahya'nın 28 km Kuzeybatısındaki Seyitömer Bölgesinde SLİ Tesisleri ile entegre olarak 150 MW gücünde 4 ünite halinde inşa edilen ve toplam 600 MW kurulu gücündeki Seyitömer Termik Santrali, Türkiye toplam kurulu kapasitesinin % 1,1'ini temsil etmektedir.

Üretim için gerekli olan kömür Çelikler Seyitömer Linyitleri İşletmesinden, su ise 13 km mesafede bulunan ENNE Barajından temin edilmektedir (Çelikler Holding, 2015)

3.2.2 Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külünün Özellikleri

3.2.2.1 Fiziksel Özellikleri

Seyitömer Termik santrali uçucu külün elek altı değeri ve yoğunluk ölçümleri Tablo 3.2' deki gibidir.

Tablo 3.2 Uçucu külün elek altı değeri ve yoğunluk ölçümleri (Çicek ve Tanrıverdi, 2014)

Özellikler	%80 in geçtiği elek altı değeri (μm)	Özgül ağırlık (g/cm^3)	Yığın yoğ. Sıkıştırılmış (g/cm^3)	Yığın yoğ. Gevşek (g/cm^3)
Seyitömer UK	240	2,1888	0,7	0,6

3.2.2.2 Kimyasal Özellikleri

Seyitömer uçucu külü, kireç miktarının % 10 oranının altında olması ve silis miktarının % 25' in üzerinde olmasından dolayı, TS EN 197-1'de verilen V sınıfına (silissi uçucu kül) dahil edilmektedir. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı ASTM C 618 standartına göre % 70' in üzerinde ve CaO' in % 10'dan az olması sonucunda, F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir.

TS 639 standartında istenen şarta $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 'in % 70'in üzerinde olmasından dolayı uymaktadır.

SO_3 değeri TS EN 450 standardında, SO_3 için istenen en fazla % 3 sınırları altında kalmaktadır. Bu sonuçlara dayanarak, Seyitömer uçucu külü dört ayrı standartta kimyasal bileşen bakımından istenilen şartlara tam anlamıyla uyumluluk göstermektedir.

3.2.2.3 Mineralojik Özellikleri

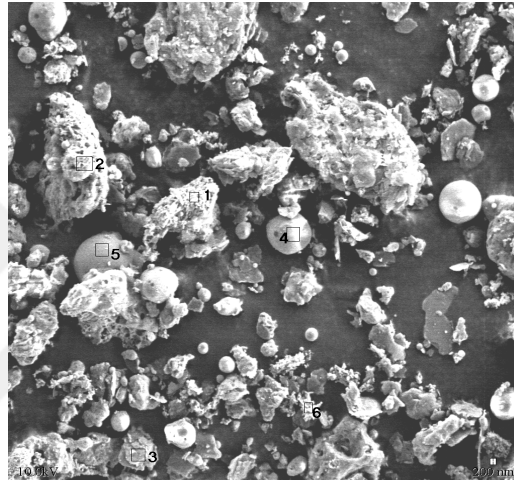
Seyitömer uçucu külünde Kuvars (SiO_2), Hematit (Fe_2O_3), Anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), Mullit ($\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}$) ve Magnezyoferrit ($\text{MgFe}^{++2}\text{O}_4$) ana fazlar olarak tespit edilmiştir.

3.2.2.4 Morfolojik Özellikleri

Seyitömer uçucu külü, 1-30 μm arasında değişmektedir. Farklı morfolojide tanecikler içeren uçucu kül, 10 mikron' un altındaki taneciklerinin içi dolu camsı kürecikler olarak bulunduğu saptanmıştır.

Seyitömer külü az miktarda mikrosfer içermesine rağmen çok miktarda gözenekli parçacıklar ihtiva etmektedir. Şekilsiz gözenekli taneciklerin, yapılan mikro analizlerinde, Kalsiyum alumina silikatlar, Anhidrit, kaolinitten oluşmuş mullit, yanmamış karbon oldukları tespit edilmiştir. Şekil 3.2 'de Seyitömer termik santrali uçucu külünün SEM görüntüsü gösterilmektedir.

Tanelere yapılan analizde, bazı taneciklerin yüzeyinde magnesioferrit ve hematit olduğu, masif kütle halinde sık rastlanmayan yapıların alkali feldispat bileşiminde olduğu tespit edilmiştir. Magnesioferrit ve hematit demir oksit esaslı bileşenlerdir. Kömürden gelen demir oksidin spinel grubunu oluşturan oksitlerle birleşmesi sonucu meydana gelmektedirler. Taneciklerin HF-asitte çözülmesi sonrası incelemede çözünmüş camsı yapı, mullit kristalleri ve değişime uğramamış kuvars kristalleri bulunmuştur. Mullit, kaolinit kilinin metamorfizasyonu sonucu oluşum göstermektedir.



Şekil 3.2 Seyitömer termik santrali uçucu külü SEM görüntüsü (Çicek ve Tanrıverdi, 2014)

BÖLÜM DÖRT

KAYNAK ÖZETLERİ

Uçucu küllerin agrega üretiminde kullanımı ile ilgili araştırmalar, önemli bir derecede ivme kazanmıştır. Hafif beton karışımına ince agreganın belli bir bölümü yerine uçucu kül eklenerek yapılan çalışmalarda olumlu sonuçlar tespit edilmiştir. Uçucu küllerden elde edilen hafif agregalar ile ilgili literatürde oldukça çok çalışma bulunmaktadır. Yapılan bu çalışmalarda, yüksek sıcaklıkta sinterlenerek uçucu küllerden yapay iri hafif agrega olarak üretilmiş ve hafif beton yapımında da kullanılmıştır. Ardından hafif betonun özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Günümüzde İngiltere’de hafif agrega olarak inşa edilen bir santral inşaatındaki beton üretiminde 1.350 ton sinterlenmiş uçucu külden faydalanılmıştır (Davies, 1996).

Ceylan ve Saraç (2006), pomzanın taşıyıcı olmayan hafif beton üretiminde, hafif agrega olarak kullanımını ve pomza kullanılarak üretilmiş hafif betonların sıcaklık etkisinden sonraki dayanımlarını incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan farklı pomza türlerinin, hafif agrega özellikleri incelendikten sonra, belirlenen 26 karışıma ait 3 farklı çimento oranında, 78 ayrı hafif beton dökümü yapmışlardır. Elde edilen betonların kuru birim hacim ağırlık, dayanım, su emme gibi özelliklerini belirlemişlerdir. Çalışmadaki bulgulara göre, en hafif betonu Kayseri-Talas pomzasına ait bir karışımdan elde etmişlerdir. İzmir- Menderes perlitik pomzasından üretilen hafif beton numunelerinin en uygun su emmesine (% 12-18 aralığında) sahip olduğunu görmüşlerdir. 28 günlük doğal ortam kürlenmesi sonrası ölçülen basınç dayanım değerleri ile, sıcaklık uygulamasından sonra ölçülen basınç dayanım değerleri genel olarak uyum göstermemiştir. Yaklaşık % 17 oranında çimento katkılı hafif beton numunesinin basınç dayanımının 25 kg/cm^2 ’ den yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Temiz ve Akçakale (2014), pomza agregalı hafif beton numunelerinin dayanım ve yalıtım özelliklerini araştırmıştır. Katkı maddesi olarak uçucu kül, ahşap talaşı ve öğütülmüş portakal kabuğu kırıntısı kullanmışlardır. 7 günlük numunelerin tümünün basınç dayanımını 20 MPa dan düşük bulmuşlardır. 28 günlük numunelerde en yüksek basınç dayanım değerini Afşin- Elbistan Termik Santrali uçucu külü içeren numunede

23,53 MPa bulmuşlardır. Ahşap talaşı katkısı olan numunelerin yüklemekten sonra dağılım göstermediklerini ancak su emme oranlarının fazla çıktığını, kurutulmuş portakal kabuğu kırıntısının ise su gereksinimini biraz düşürdüğünü belirtmişlerdir. Saptanan bulgulara göre uçucu kül, ahşap talaşı ve portakal kabuğu kırıntısının pomzalarla birlikte kullanılmasıyla ısı ve ses yalıtım özellikleri iyi olan malzeme ürettiklerini vurgulamışlardır.

Turan (2010), yaptığı çalışmada pomza agregası kullanıp farklı oranlarda mineral katkı ile elde ettiği karışımlardan hafif beton üretmiştir. Bu hafif betonları basınç dayanımı testi, eğilme dayanımı testi ve elastisite modüllerinin tespiti için bazı mekanik deneylere tabi tutmuştur. Ağırlıkça oran olarak % 10, % 25 ve % 40 uçucu kül ile hazırladığı karışımlar ile hafif beton üretmiştir. Araştırmanın sonunda ise birim hacim ağırlığı yaklaşık 1840 kg/m^3 olan hafif betonlar elde etmiştir. Turan, uygun değerler olarak % 10 ile % 20 uçucu kül kullanımıyla betonun performansını arttırdığını belirtmiştir.

Türkel ve Kadiroğlu (2007), pomza agregası ile taşıyıcı amaçlı hafif betonlar üretmeyi amaçlamışlardır. Hafif beton karışımlarında bağlayıcı madde olarak CEM 42.5 çimentosu ve mineral katkı olarak da silis dumanı ile uçucu kül kullanmışlardır. Ayrıca karışımlarda polikarboksilat bazlı Smart Flow süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Hafif agregalı betonların su/çimento oranını, çimento dozu esasına dayanılarak hafif agregalı betonların ön görülen kıvamına göre belirlemişlerdir. Dökülen hafif beton numunelerini 7 ve 28 günlük iki farklı yaşta basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı testlerine tabi tutmuşlardır. Basınç dayanımlarını 15 cm ayrıtlı küp örnekler üzerinde test ederken, eğilme dayanımlarını 10x10x60 cm ayrıtlı prizma örnekler üzerinde test etmişlerdir. Deneylerden elde edilen sonuçları, 3'er adet örneğin ortalaması olarak hesaplamışlardır. Üretilen hafif betonların TS EN 206-1 standardında hafif betonlar için belirtilen LC 20/22 ve LC 25/28 dayanım sınıflarını sağladığını belirtmişlerdir. Üretilen hafif betonların aynı zamanda taşıyıcı hafif betonlar için Amerikan Beton Enstitüsü tarafından yayınlanan ACI 213R-87 raporunda belirtilen 28 günlük basınç dayanımı en az 17,2 MPa olan beton tanımına uyduğunu vurgulamışlardır. Eğilme deneyine tabi tutulan prizma

örneklerinin yüzeylerinin normal betonlara göre daha az pürüzlü olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca hafif betonların eğilmede çekme dayanımı, normal betonlara göre daha düşük kaldığını belirtmişlerdir.

Dikici (2010), kendi çalışması kapsamında pomza agregası kullanıp farklı oranlarda karışım elde ederek üç ayrı taşıyıcı hafif beton üretmiştir. Ürettiği hafif betonları farklı yaş (7, 28, 56) ve farklı kür koşullarında mekanik deneylere tabi tutmuştur. Mekanik özelliklerden basınç dayanımını, eğilme dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve elastisite modülünü araştırmıştır. Basınç dayanımı için 75 mm ayrıtlı küp numuneler, eğilmede çekme dayanımı için 75*75*300 mm ayrıtlı prizma numunelerden faydalanmıştır. Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ile farklı karışımlardan elde edilen hafif beton numunelerinin birim hacim ağırlığı 1900 kg/m³ civarında olduğunu ve 28 günlük basınç dayanımı değeri ise 23 MPa olduğunu belirtmiştir.

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Amaç

Bu çalışmada, uçucu külden hafif agregâ üretimi amaçlanmıştır. Üretilen hafif agregalar ile değişik oranlarda mineral katkı malzemesi karıştırılarak, birim hacim ağırlığı 2 t/m³' ten düşük ve ayrıca basınç dayanımları yüksek olan hafif beton üretilmesi amaçlanmıştır. Bu hedef doğrultusunda üretilen hafif betonların zamana bağlı olarak mekanik özellikleri incelenmiştir. Endüstri atığı olan uçucu külün maliyeti yaklaşık olarak çimento maliyetinin %5 i civarındadır (Yeğınobalı, 1971). Çalışma bu uygun maliyetli atık malzemenin yapı sektöründe değerlendirilmesini hedeflemektedir.

5.2 Kapsam

Bu çalışma kapsamında;

- Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir.
- Beş farklı oranda kireç ve alçı karışımları denenerek çeşitli peletler (hafif agregalar) üretilmiştir.
- Üretilen hafif agregaların karakterizasyon testleri ve dayanım testleri yapıldıktan sonra optimum şartları sağlayan hafif agregâ seçilmiştir.
- Seçilen optimum hafif agregalardan yaklaşık 100 kg üretilmiştir.
- Üretilen bu hafif agregalar ile değişik oranlarda portland çimentosu, ve uçucu kül katkısı karışımı (%16, %20, %24) kullanılarak 3 ayrı tip hafif beton üretilmiştir.
- Üretilen betonlar 1, 3, 7, 14, 28 günlük su kürüne tabi tutulmuştur.
- Basınç dayanımı, 70x70x70 mm boyutlarında kübik numuneler ile tespit edilmiştir.
- Eğilmede çekme dayanımı ise 50x50x300 mm ayrıtlarında prizmalar ile tespit edilmiştir.

5.3 Malzeme

5.3.1 Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külü

5.3.1.1 Numune Alma

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül numunesi; Seyitömer Termik Santrali elektro filtre alt çıkışlarından yöntemine uygun olarak alınmıştır. Santralde numuneler herhangi bir işleme tabi tutulmadan direk Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarına getirilmiştir (Şekil 5.1).



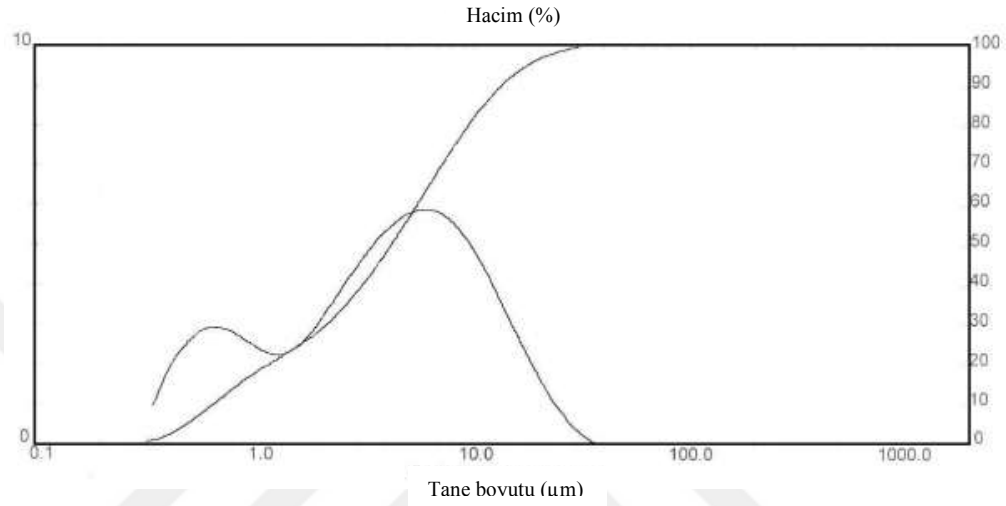
Şekil 5.1 Seyitömer uçucu külü

5.3.1.2 Numune Hazırlama

Alınan uçucu kül örneklerine, herhangi bir fiziksel işlem olmadan yöntemine uygun olarak numune azaltma işlemleri uygulanmıştır. Hazırlanan her numune birbirlerini ve alınan asıl numuneyi temsil edecek şekilde azaltılmıştır. Bu numuneler uygun poşetlerde deneylerde kullanılmak üzere saklanmıştır. Santralden getirilen numunenin geri kalanı Numune Laboratuvarında uygun şartlarda varillerin içinde saklanmıştır.

5.3.2 Sönmüş Toz Kireç

Hafif agregada üretiminde kullanılmak üzere Torbalı Kimtaş A.Ş. kireç fabrikasından çok ince tane boyutlu sönmüş kireç temin edilmiştir. Sönmüş toz kirecin tane boyutu 30 mikron altındadır (Şekil 5.2). Ca(OH)_2 oranı % 90 iken, CaO oranı ise % 66,26 dır.



Şekil 5.2 Sönmüş kirecin tane boyut dağılımı

5.3.3 Yapı Alçısı

Hafif agregada üretiminde kullanılmak üzere alınan alçının kimyasal özellikleri Tablo 5.1' de belirtilmiştir.

Tablo 5.1 Yapı alçısının kimyasal analizi

Bileşen	%
CaO	37,14
SO ₃	55,49
MgO	0,26
Na ₂ O	0,02
K ₂ O	0,005
Fe ₂ O ₃	0,04
Al ₂ O ₃ +SiO ₂	0,25
KK (600°C)	6,76

5.3.4 Çimento

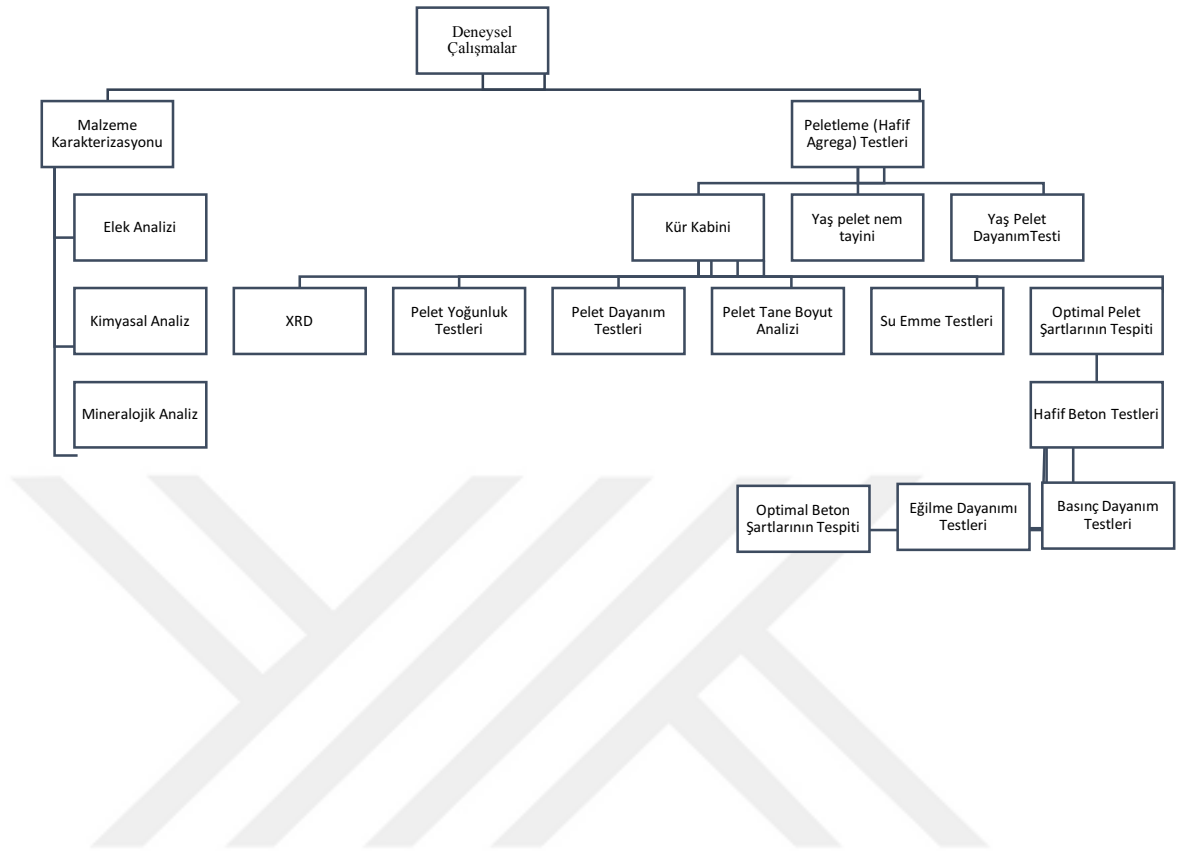
Bu çalışmada, Çimentaş İzmir Çimento Fabrikası Türk A.Ş.' den getirilen ve TS EN 197-1 standardına uygun olan TIP 1 42.5 Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 5.2' de belirtilmiştir (Çimentaş, 2016)

Tablo 5.2 Tip 1 42,5 R çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri (Çimentaş, 2016)

2 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28,7
7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	44,4
28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	52,9
SO ₃ (%)	2,8
MgO (%)	1,1
Cl (%)	0,009
Kızdırma Kaybı (%)	2,7
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,2
Özgül yüzey (cm ² /g)	3650
Serbest Kireç (%)	1,4
Su İhtiyacı (%)	27,8

5.4 Metot ve Test Yöntemleri

Seyitömer termik santralinin uçucu küllerinden agrega üretilebilirliği, farklı oranlarda kireç ve alçı katkılı hazırlanan agregaların kür kabinde oluşturulmasıyla yeterli mekanik dayanımda agregaların elde edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Optimal hafif agrega şartları belirlendikten sonra o şartlara göre üretilen hafif agregalar hafif beton yapımında kullanılmıştır. Farklı oranlarda uçucu kül ve çimento katkılı hazırlanan hafif betonlar bazı mekanik testlere tabii tutulmuştur. Hafif agrega ve hafif beton üretiminde uygulanan prosesler Şekil 5.3 'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Deneysel çalışmalar akım şeması

5.4.1 Malzeme Karakterizasyonu

5.4.1.1 Kimyasal Analiz Yöntemleri

5.4.1.1.1 Kızdırma Kaybı Analizi. Uçucu külün kızdırma kaybının bulunması için izlenen yollar aşağıda sırasıyla maddeler halinde verilmiştir.

- Platin kaplar tartılıp darası kaydedilmiştir.
- Platin kaplara 1gr uçucu kül konulmuştur.
- 1000 °C sıcaklıktaki fırında 2 saat bekletilmiştir.
- Desikatörde soğutulmuştur ve daha sonra tartımı alınmıştır.

İşlem uygulandıktan sonraki uçucu kül kaybı kızdırma kaybı olarak hesaplanmıştır.

5.4.1.1.2 Sülfür Analizi. Uçucu külün sülfür içeriğinin bulunması için izlenen yollar aşağıda sırasıyla maddeler halinde verilmiştir.

- 0,1 g uçucu kül, 0,3 g demir, 2,2 g tungsten karıştırılmıştır.
- Eltra CS2000 karbon, kükürt belirleyicisinde iki kez okuma yapılmıştır.
- Değerlerin ortalaması kükürt içeriğini vermektedir.

5.4.1.1.3 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 ve MnO Analizi. Uçucu külde bulunan diğer bileşenlerin içeriğinin bulunması için izlenen yollar aşağıda sırasıyla maddeler halinde verilmiştir.

- Platin kaplara 0,250 g uçucu kül ve toplamda 3 g olacak şekilde dilityum tetraborat eklenmiştir.
- Karıştırıldıktan bir saat 1000 °C sıcaklığındaki fırında bekletilmiştir.
- Numune behere konulduktan sonra 100 ml saf su, 10 ml HC eklenerek 185 °C sıcaklığındaki ocakta çözdürülmüş, balon jojeye aktarılmış ve okuması yapılmıştır.

5.4.1.2 Mineralojik Analiz Yöntemleri

Kül ve agrega örneklerinin X-Ray difraksiyon analizi bölümümüzdeki X-Ray laboratuvarında bulunan Rigaku MiniFlex 2 model X-ray Difraktometre cihazı ile yapılmıştır (Şekil 5.4). Bunun için malzeme analiz boyutu olan 100 μ m tane boyutuna öğütülmüştür. Difraksiyon için toz örnek cam aparat üzerine yerleştirilip analiz gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri 32 kV, 22 mA'de Nikel filtre kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.4 Rigaku marka XRD analiz cihazı

Numunelere ait SEM görüntüleri ise Jeol marka JXA-733 Superprobe cihazı kullanılarak elde edilmiştir.

5.4.2 DeneySEL Çalışmalarda Uygulanan Test Yöntemleri

5.4.2.1 Peletleme Testi

Karakterizasyon çalışmaları yapılan Seyitömer uçucu külü, farklı oranlarda kireç ve alçı ile karıştırılmıştır (Tablo 5.3).

Tablo 5.3 Peletlerin karışım oranları

Karışım No.	Uçucu Kül Miktarı (%)	Kireç Miktarı (%)	Alçı Miktarı (%)
1	88	12	-
2	88	10	2
3	88	8	4
4	88	6	6
5	88	4	8

Peletleme şartları Tablo 5.4’ te gösterilmiştir. Elde edilen agregaların öncelikle nem tayini, yaş dayanım testleri yapılmış ardından kür kabini testlerine geçilmiştir.

Tablo 5.4 Peletleme şartları

Tava Eğimi	30°
Sıyırıcı Eğimi	25°
Hız	60 dev/ dk

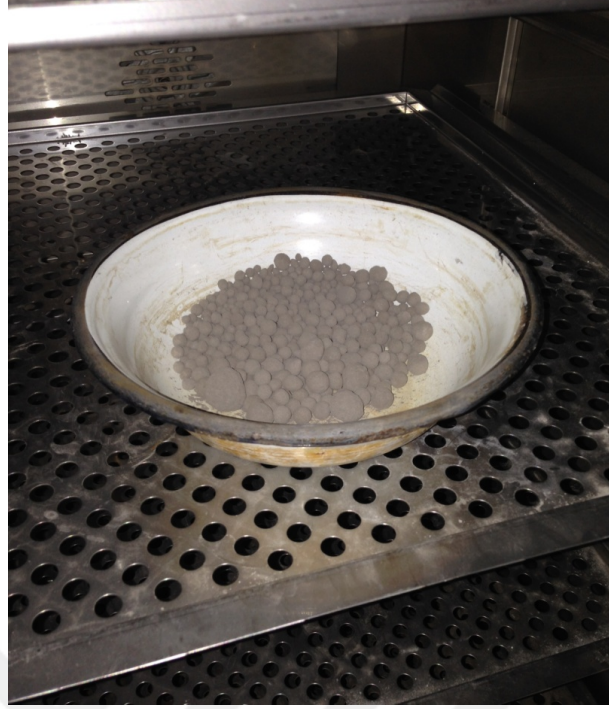
Peletleme işlemleri, Evreka Apparatenbau GmbH marka peletleme tavaasında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 2.5 Peletleme tavaası ve hafif agregalar

5.4.2.1.1 Nem Tayini. Nem tayini, peletleme işleminde uçucu kül, kireç ve alçı karışımının agrega oluşturabilmesi için gerekli olan su miktarı belirlenmesi işlemidir. Elde edilen agreganın yaş ağırlığı ile etüvden çıkan kuru ağırlığının oranıyla hesaplanmıştır. Nem tayini için kullanılan peletler Şekil 5.6’ da gösterilmiştir.

$$\text{Nem içeriği} = \frac{m_{\text{yaş}} - m_{\text{kuru}}}{m_{\text{yaş}}} \times 100 \quad (5.1)$$



Şekil 5.6 Nem tayini için kullanılan peletler

5.4.2.1.2 Tane Boyutuna Göre Yaş Dayanım Testleri. Seyitömer termik santrali uçucu külünden elde edilen % 12 kireç katkılı agregaların yaş dayanım testleri iki şekilde yapılmıştır. Bunlar düşme testi ve yaş dayanım testidir.

Düşme testi;

Üretim aşamasında elde edilen agregaların kür kabinine nakliyesi bantlarla sağlanmaktadır. Bu sebeple agregaların yaklaşık yarım metre yükseklikten düşmeye dayanıklı olması gerekmektedir. Düşme testi 45 cm yükseklikten gerçekleştirilmiştir.

Yaş dayanım testi ise;

Kireç katkılı yaş agregaların dayanım testleri Chatillon & Sons marka pres makinesi ile yapılmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Chatillon & Sons marka dayanım test cihazı

5.4.2.2 Kür Kabini Testleri

5 farklı karışımdan üretilen peletler % 95 relatif nem ve 50 °C sıcaklıkta çalışan Nuve marka TK 252 model kür kabine konulmuştur (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Nuve TK 252 kür kabini ve peletler

5.4.2.2.1 Pelet Dayanım Testleri. Kür kabini içinde bulunan hafif agregaların 1, 3, 7 ve 14 günlük dayanım testleri 5 tonluk pres cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 5 tonluk pres

5.4.2.2.2 XRD Testleri. 5 farklı karışımdan üretilen hafif agregaların X-Ray difraksiyon analizi Rigaku MiniFlex 2 model X-ray Difraktometre cihazı ile yapılmıştır.

5.4.2.2.3 Su Emme Testleri. Dayanım testleri ve XRD analizi sonucunda saptanan en uygun peletlere su emme testi uygulanmıştır. Su emme kabiliyetini test edebilmek için numune yirmi dört saat boyunca suda bırakılmıştır. Ardından su emme oranı hesaplanmıştır.

5.4.2.2.4 Pelet Yoğunluk Testleri. Gerçek yoğunluk; Optimal peletlerin gerçek yoğunluğu bulmak amacıyla Micromeritics AccuPyc II 1340 cihazı ile ölçüm yapılmıştır (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 Micromeritics AccuPyc II 1340 yoğunluk cihazı

Birim hacim ağırlık;

Cismin birim hacim ağırlığının hesaplanabilmesi için pelet içindeki porların dikkate alınması gerekmektedir. Su emme testleri sonucunun yardımıyla pelet içerisindeki porların hacmi bulunduktan sonra peletlerin birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır.

5.4.2.2.5 SEM Analizi. Elektron kaynağından elde edilen ışınlar vakum altında elektron demetleri haline getirilerek numune yüzeyi üzerinde tarama işlemi yapmaktadır.

SEM’ de 3 tip görüntü meydana gelir. Bunlar;

- İkincil Elektron görüntüleri (Secondary Electron)
- Geri Saçılmış Elektron Görüntüleri (Back Scattered Electron)
- Elementsel X-Işını Haritaları

SEM analizi Joel marka Superprobe 733 model cihazda gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.11). Cihazda numuneleri inceleyebilmek için öncelikle cihaza uygun numuneler hazırlanmıştır. SEM cihazında inceleme yapabilmek için numunenin iletken olması

gerekmektedir. Bu yüzden hazırlanan numunelere C kaplama yapılmıştır. Ardından SEM cihazında 10 kV enerjide, 1000x, 2000x, 4000x ve 6000x büyütmelerde incelemeler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.11 Joel marka SEM analiz cihazı

5.4.2.3 Hafif Beton Testleri

Optimal peletler belirlendikten sonra hafif beton testleri uygulanmıştır. Hafif beton yapımında kullanılan peletlerin elek analizi Tablo 5.5’ te verilmiştir.

Tablo 5.5 Peletlerin elek analizi

Tane Boyutu (mm)	Ağ (%)
-12,5+9,51	31,11
-9,51+4,76	42,94
-4,76+3,35	19,98
-3,35+2	3,16
-2	2,81
Toplam	100

Ağırlıkça % 16, % 20 ve % 24 portland çimentosu kullanılarak 3 farklı karışım eldeleri ile taşıyıcı hafif betonlar üretilmiştir. Üretilen betonlar 1, 3, 7, 14, 28 günlük su kürüne tabi tutulmuştur. Mekanik testlerden basınç dayanımı tespiti için 70x70x70 mm boyutlarında kübik numunelerden faydalanılmıştır. Eğilme dayanımı, 50x50x300 mm ayrıtlarında prizmalar ile tespit edilmiştir.

Yapılan test türlerine göre kullanılan numune tiplerinin boyutları ve numune sayısı Tablo 5.6 ' da belirtilmiştir.

Tablo 5.6 Test türleri ve kullanılan numune tipi ve sayısı

Test Türü	Numune Boyutları	Toplam numune sayısı
Basınç Dayanımı Testi	70*70*70 mm küp	45
Eğilme Dayanımı Testi	50*50*300 mm prizma	45

5.4.2.3.1 Basınç Dayanımı Testleri. Bu deneysel çalışmada, üretilen hafif agregalar ile 3 farklı oranda uçucu kül ve çimento karışımı elde edilmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 Hafif agregalar, uçucu kül ve çimento karışımı

Karışımındaki numune miktarları Tablo 5.7’ de gösterilmiştir. Harç üretiminde su yaklaşık karışımın % 50 oranında eklenmiştir. Elde edilen karışımlar, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı’ ndan temin edilen 70*70*70 mm boyutlarında kübik kalıplara doldurulmuştur. Betonun kalıba yerleşme işlemi tokmaklar ile yapılmıştır (Şekil 5.13).

Tablo 5.6 Test türleri ve kullanılan numune tipi ve sayısı

Karışım No.	1 Ağ (%)	2 Ağ (%)	3 Ağ (%)
Hafif Agrega	55	55	55
Portland Çimentosu	16	20	24
Seytömer Uçucu Külü	29	25	21



Şekil 5.13 Hafif beton karışımının kalıplara doldurulması

Dökülen hafif beton numuneleri, oda sıcaklığında Kaya Mekaniği Laboratuvarında prizlenmeye bırakılmıştır. Numuneler gün aşırı ıslatılarak nemli kalması sağlanmıştır.

Numuneler 1, 3, 7, 14 ve 28. günlük priz yaşlarında betonlar kalıplarından dikkatlice çıkarıldıktan sonra basınç dayanımına tabi tutulmuştur (Şekil 5.14).



Şekil 5.14 300 Ton kapasiteli hidrolik pres

Sertleşmiş beton numunelerin 3, 7, 14, ve 28. yaşlarındaki basınç dayanım testleri TS EN 12390-3 standartına göre uygulanmıştır. Basınç dayanımı testi 300 Ton kapasiteli hidrolik pres ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15 Numunenin prese yerleştirilmesi

Basınç dayanımları, her bir deney için kırılan üç numunenin dayanımlarının aritmetik ortalaması alınarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5.2)$$

f_c = Basınç dayanım değeri, MPa (N/mm^2),

F = Kırılma anında ulaşılan maksimum yük, N

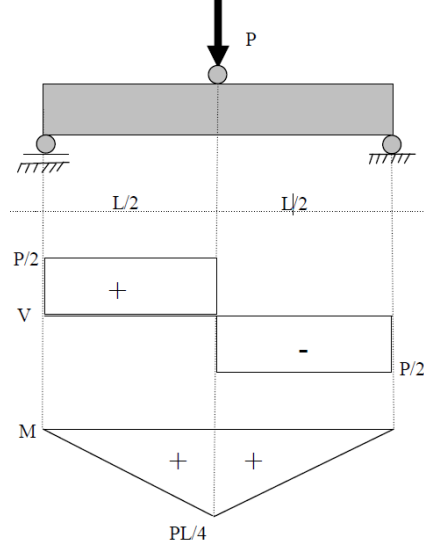
A_c = Numunenin üzerine basınç kuvvetinin uygulandığı kesit alanı, mm^2 dir.

5.4.2.3.2 Eğilme Dayanımı Testleri. Bu çalışmada, üretilen hafif agregalar tekrar 3 farklı oranda uçucu kül ve çimento ile karıştırılarak eğilme dayanımı için karışım elde edilmiştir. Elde edilen karışımlar, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'ndan temin edilen 50*50*300 mm boyutlarında prizma kalıplara doldurulmuştur (Şekil 5.16).



Şekil 5.16 Hafif beton karışımının kalıplara doldurulması

Eğilme dayanımı testi, numunelerin 3, 7, 14 ve 28. yaşlarında TS EN 12390-5 standartına bakılarak Şekil 5.17’ de izah edildiği gibi ortasına kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.17 Eğilme dayanımı testi teorik gösterimi (Dikici, 2010)

Numuneler 1, 3, 7, 14 ve 28. günlük priz yaşlarında betonlar kalıplarından dikkatlice çıkarıldıktan sonra eğilme dayanımına tabi tutulmuştur. Eğilme dayanımı testi 5 Ton kapasiteli pres ile yapılmıştır (Şekil 5.18).



Şekil 5.18 Numunenin prese yerleştirilmesi

Eğilme deneyi sonuçları aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$f_{ct} = \frac{3FL}{2d_1d_2^2} \quad (5.3)$$

f_{ct} = Eğilmede çekme dayanım değeri, MPa (N/mm²),

F = Maksimum kuvvet, N

L = Mesnet silindirleri arasındaki mesafe, mm

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



BÖLÜM ALTI

BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1 Fiziksel Karakterizasyon Sonuçları

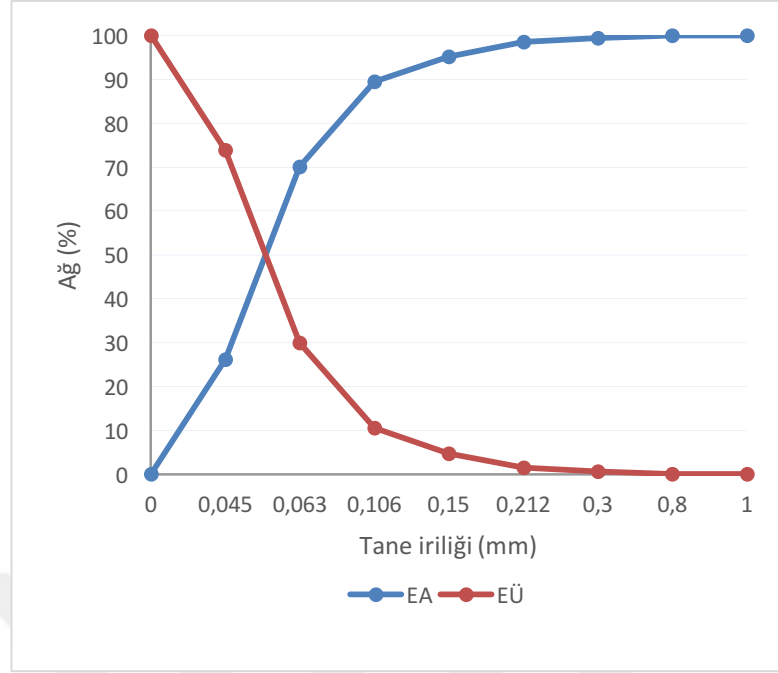
Bu bölümde, Seyitömer uçucu külünün elek analizi, kimyasal analizi ve mineralojik analizi sonuçları değerlendirilmiştir.

6.1.1 Seyitömer Uçucu Külü Elek Analizi Sonuçları

Seyitömer uçucu külünün elek analizi Tablo 6.1’ de, elek altı ve elek üstü grafikleri ise Şekil 6.1 'de verilmiştir.

Tablo 6.1 Seyitömer uçucu külü elek analizi sonuçları

Tane iriliği (mm)	Ağırlık (%)	E.A (%)	E.Ü (%)
+0,800	0,02	100,00	0,02
0,800-0,300	0,52	99,98	0,54
0,300-0,212	0,93	99,46	1,46
0,212-0,150	3,30	98,54	4,76
0,150-0,106	5,73	95,24	10,49
0,106-0,063	19,43	89,51	29,92
0,063-0,045	43,94	70,08	73,86
-0,045	26,14	26,14	100,00
Toplam	100		



Şekil 6.1 Seyitömer uçucu külünün elek altı-elek üstü grafikleri

Şekil 6.1' den görüleceği gibi malzemenin d_{80} i 100 μm altındadır.

6.1.2 Seyitömer Uçucu Külü Kimyasal Analizi Sonuçları

Seyitömer uçucu külü kimyasal analiz sonuçları Tablo 6.2' de belirtilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde,

- TS EN 197-1 standartında belirtilen kireç miktarı % 10' unun altında olmasından dolayı (4,77) , V sınıfı uçucu kül sınıfına dahil olmaktadır.
- ASTM C 618 standartına dayanarak $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı % 87,02 olup % 70'in üzerinde olduğu için ve ek olarak, CaO miktarı % 10 oranından düşük olduğu için F sınıfı uçucu küllere dahil olmaktadır.
- $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının %70 değerinin üzerinde olmasından dolayı TS 639 standartına uyumluluk göstermektedir.

Tablo 6.2 Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları

Bileşik	Miktar (%)
SiO ₂	55,43
Al ₂ O ₃	18,85
Fe ₂ O ₃	12,74
CaO	4,77
SO ₃	1,49
MgO	4,54
Na ₂ O	0,57
K ₂ O	1,39
TiO ₂	0,10
MnO	0,10
Kızdırma Kaybı	2,26

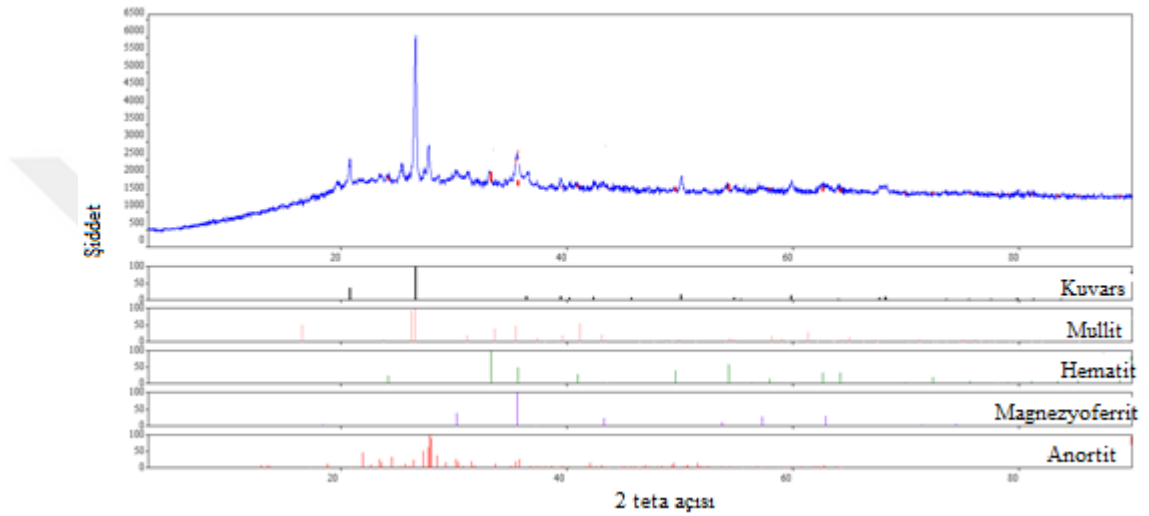
TS EN 450 standardında belirtilen, SO₃ için istenen %3 sınır değeri ile kimyasal analiz sonucu ulaşılan SO₃ değeri ile (% 1,49) uyumaktadır. Kızdırma kaybı da 2,26 değeriyle tüm standartlara uymaktadır. (Tablo 6.3)

Tablo 6.3 Seyitömer uçucu külünün standart uygunluk sınırları

Standart Uygunluk Sınırları							
Bileşik (%)	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO ₂	55,43						
Al ₂ O ₃	18,85						
Fe ₂ O ₃	12,74						
S+A+F	87,02				>70,00	>70,00	>50,00
CaO	4,77					<10,00	>10,00
SO ₃	1,49	<3,00			<5,00	<5,00	<5,00
MgO	4,54				<5,00		
Na ₂ O	0,57						
K ₂ O	1,39						
TiO ₂	0,10						
MnO	0,10						
KK	2,26	<5,00	<5,00	<5,00	<10,00	<6,00	<6,00

6.1.3 Seyitömer Uçucu Külü Mineralojik Analizi Sonuçları

Seyitömer uçucu külünün X- ışınları difraktogramında elde edilen mineralojik verileri Şekil 6.2’ de verilmiştir. Seyitömer uçucu külünde Kuvars (SiO_2), Hematit (Fe_2O_3), Anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), Mullit ($\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}$) ve Magnesioferrit ($\text{MgFe}^{+++2}\text{O}_4$) ana fazlar olarak tespit edilmiştir. Ek olarak, kuvars kristalinin maksimum pikine yakınlığı nedeniyle camsı faz ve silissi özellik taşıdığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6.2 Seyitömer termik santrali uçucu külü X-Işınları difraktogramı

6.2 Peletleme (Hafif Agrega) Testi Sonuçları

Bu bölümde ise, hafif agregaların nem tayini testi, düşme ve yaş dayanım testi, basınç dayanım testi, XRD analizi, SEM analizi, su emme testi ve yoğunluk testleri sonuçları verilmektedir.

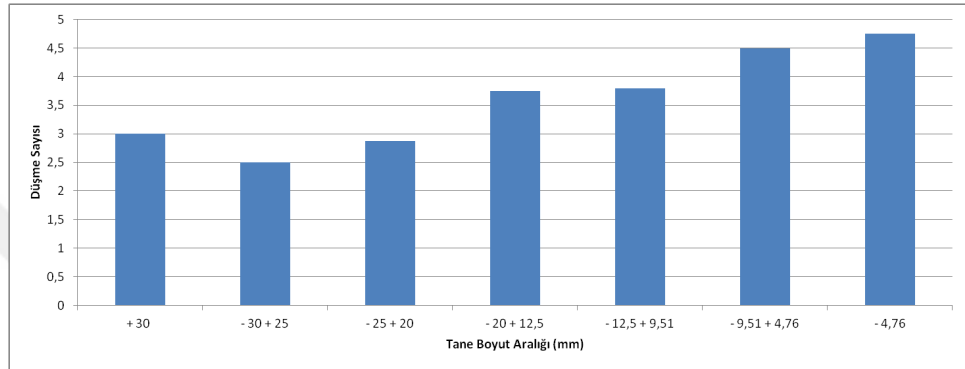
6.2.1 Hafif Agregaların Nem Tayini Testi Sonuçları

Üretilen hafif agregaların yaş ağırlığı 104,04 g, etüvden çıktıktan sonraki ağırlığı 79,9 g' dır. Nem içeriği % 23,20 olarak hesaplanmıştır.

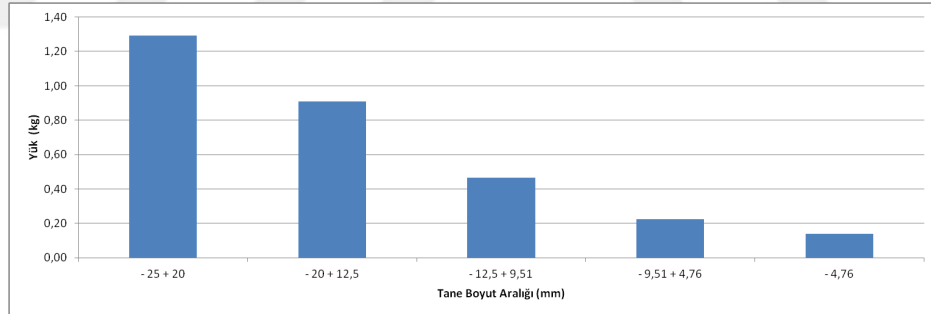
$$\text{Nem içeriği} = \frac{104,04 - 79,9}{104,04} \times 100 = \% 23,20$$

6.2.2 Hafif Agregaların Düşme ve Yaş Dayanım Testleri Sonuçları

% 88 UK ve % 12 kireç katkılı hafif agregaların düşme testi sonuçları Şekil 6.3' te yaş dayanım testi sonuçları ise Şekil 6.4' te verilmiştir. Sadece alçı katkısız üretilen hafif agregalara yapılan düşme testi sonucu hafif agregaların tane boyutu küçüldükçe düşme sayılarının arttığı gözlemlenmiştir. Yaş dayanım testinde aksine hafif agregaların tane boyutu küçüldükçe yaş dayanımları azaldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 6.3 % 12 kireç katkılı hafif agregaların düşme testi sonuçları



Şekil 6.4 % 12 kireç katkılı hafif agregaların yaş dayanım testi sonuçları

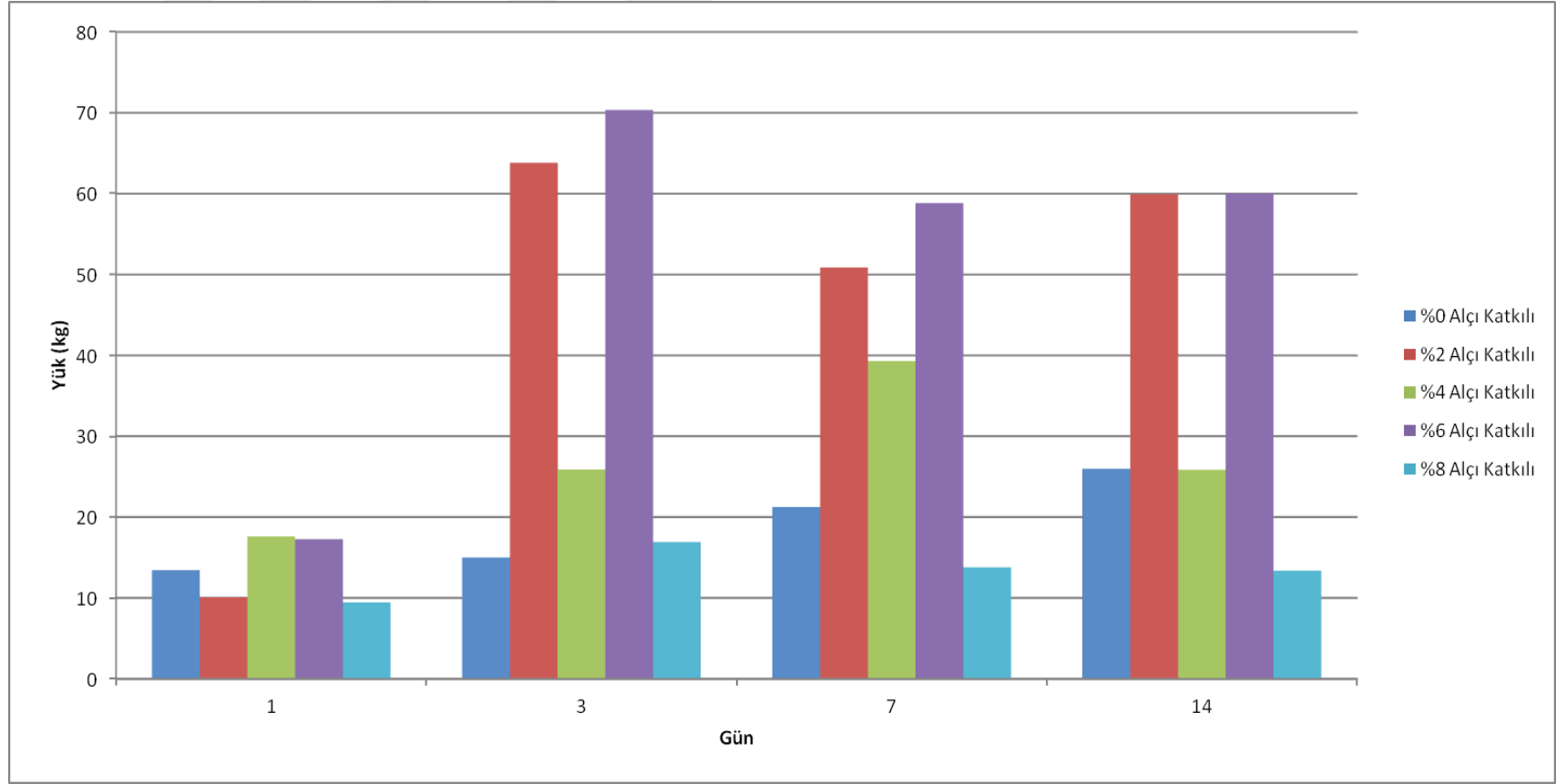
6.2.3 Hafif Agregaların Basınç Dayanımı Testi Sonuçları

Peletlerin (hafif agregaların) basınç dayanımı test sonuçları Tablo 6.4' te gösterilmiştir.

Basınç dayanım testlerinde en yüksek dayanımı gösteren optimum karışım, Şekil 6.5' teki grafikten belirlenmiştir.

Tablo 6.4 Kireç ve alçı katkılı hafif agregaların basınç dayanım testi sonuçları

	% 0 Alçı + % 12 Kireç Katkılı (kgf/cm ²)				% 2 Alçı + % 10 Kireç Katkılı (kgf/cm ²)				% 4 Alçı + % 8 Kireç Katkılı (kgf/cm ²)				% 6 Alçı + % 6 Kireç Katkılı (kgf/cm ²)				% 8 Alçı + % 4 Kireç Katkılı (kgf/cm ²)			
	Gün				Gün				Gün				Gün				Gün			
Deney	1	3	7	14	1	3	7	14	1	3	7	14	1	3	7	14	1	3	7	14
<i>I</i>	12,86	12,11	30,26	18,41	16,90	113,24	82,22	14,88	22,95	12,11	68,6	12,11	15,89	41,61	49,69	134,17	6,31	17,91	14,88	14,12
<i>II</i>	26,23	10,34	22,45	27,49	24,47	131,65	84,24	120,81	15,38	12,61	26,99	15,13	15,64	50,44	61,54	71,88	10,84	27,24	17,40	14,13
<i>III</i>	15,89	18,16	26,46	24,97	7,31	67,84	35,81	28,50	17,65	24,21	54,98	23,71	20,68	94,58	66,08	42,88	8,07	26,73	17,65	14,88
<i>IV</i>	15,38	15,89	20,93	21,43	5,80	45,14	21,44	17,91	19,67	17,91	41,61	26,73	16,39	90,04	76,42	37,07	8,58	12,11	15,89	8,08
<i>V</i>	15,89	9,58	25,22	34,30	4,79	65,32	59,02	67,84	9,58	18,16	34,80	15,90	24,21	90,04	138,97	43,38	13,11	12,11	9,58	18,92
<i>VI</i>	8,32	18,67	13,11	19,42	9,08	61,79	64,82	87,77	15,64	44,39	49,43	5,30	15,38	90,03	36,32	25,98	4,54	18,16	15,64	9,33
<i>VII</i>	10,34	16,64	17,15	17,91	8,32	42,62	54,98	37,83	19,17	17,91	15,13	33,54	17,40	156,87	75,41	73,14	7,81	6,56	13,62	11,60
<i>VIII</i>	6,30	14,12	14,12	69,61	12,61	54,73	9,33	39,09	10,09	125,85	25,98	74,40	16,39	63,05	69,10	103,91	10,09	21,69	12,61	15,38
<i>IX</i>	4,03	16,39	24,40	12,36	5,80	45,40	44,39	79,70	20,18	58,26	61,29	5,04	19,92	15,38	27,74	45,15	10,88	11,34	10,59	8,58
<i>X</i>	22,44	16,39	19,19	43,89	14,88	57,00	44,39	121,32	33,80	13,62	19,42	85,50	15,64	42,88	36,05	62,80	14,38	15,38	8,83	18,92
<i>Ort</i>	13,43	15,01	21,24	25,98	10,09	63,81	50,88	59,93	17,59	25,88	39,31	25,85	17,24	70,33	58,82	60,02	9,46	16,93	13,78	13,37



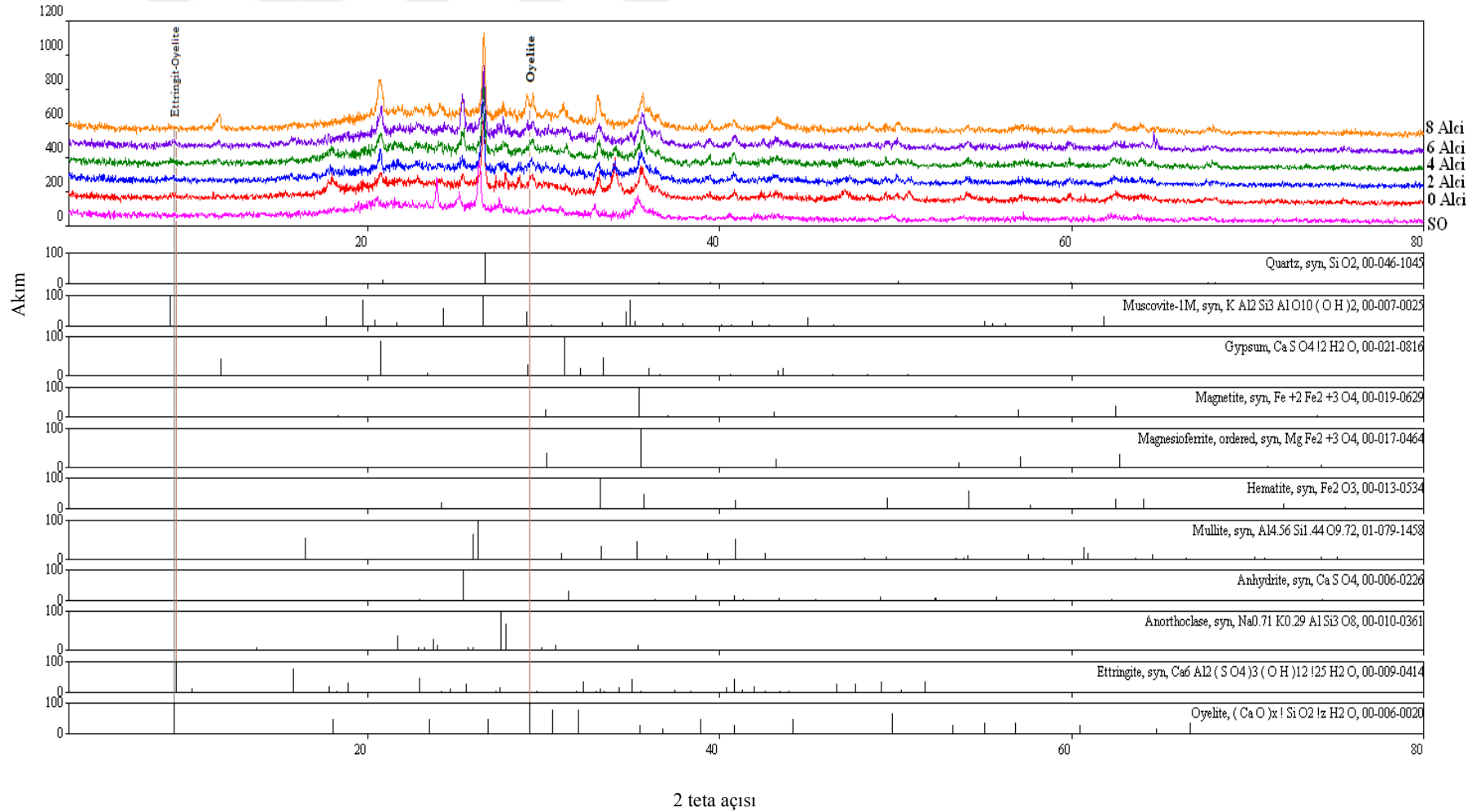
Şekil 6.5 Hafif agregalarının basınç dayanım testi sonuçlarının karşılaştırılması

Kireç ve alçı katkılı hafif agregaların basınç dayanım testi sonuçlarına bakıldığında % 6 alçı katkılı hafif agregaların maksimum dayanım gösterdiği görülmektedir. Numunelerde alçı miktarı arttıkça eklenen kireç miktarı azalmaktadır. Bu nedenle düşük kireç oranlı % 8 alçılı hafif agreganın basınç dayanımlarının düşük olduğu gözlemlenmiştir.

6.2.4 Hafif Agregaların XRD Analizi Sonuçları

Üretilen 5 farklı hafif agreganın XRD analizi yapılmıştır. Yüksek dayanım gösteren hafif agregaların XRD sonuçlarında Etringit ve Tobermorit oluşumları gözlenmesi beklenmektedir. XRD sonucu Şekil 6.6' da verilmiştir.

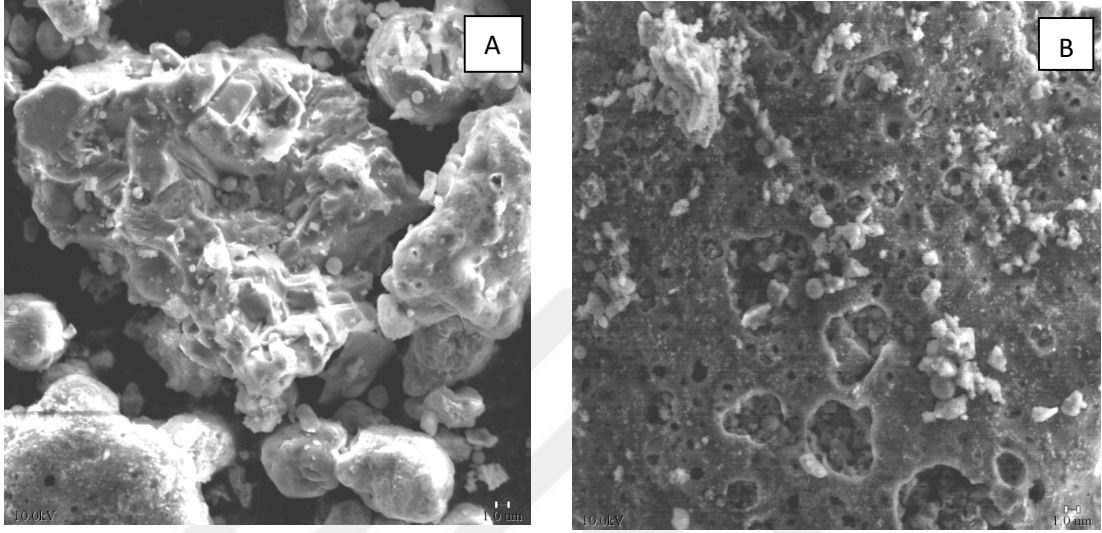
- XRD sonuçları kıyaslandığında birçok fark gözlemlenmiştir. Etringit ve tobermorit oluşumları en çok % 6 alçı içerikli numunede görülmüştür. Kullanılan jips (alçı) ve lime (kireç) % 6 alçı içerikli numunede tamamen reaksiyona girmektedir.
- Hiçbir numunede Ca gözlenmemektedir. Artan kireç yoktur.
- % 0, % 2, % 4 ve % 6 alçı içerikli numunelerde jips reaksiyona girerek tükenmiştir. Ancak % 8 alçı içerikli numunede kireç azaldığı için alçı reaksiyona girememiştir ve bir miktar artmıştır.
- Alçı en fazla % 8 alçı içerikli numunede gözlenmektedir. Bunun sebebi, yeterli Al olmadığı için reaksiyona girememektedir ve alçı kullanılamamaktadır.
- Kireç çok basit reaksiyona girerken alçı ise zor reaksiyona girmektedir. Bu sebeple kireç azaldıkça etringit ve tobermorit oluşumları gerçekleşmemiştir. Çünkü asıl reaksiyonu sağlayan Serbest Kalsiyum Oksittir.
- En büyük pikler, muskovit ve kuvarstan kaynaklanmaktadır.
- Kollasit ve Mullit oluşumları da gözlemlenmiştir.
- % 6 alçı içerikli numunede alçıdan artan anhidritler mevcuttur.



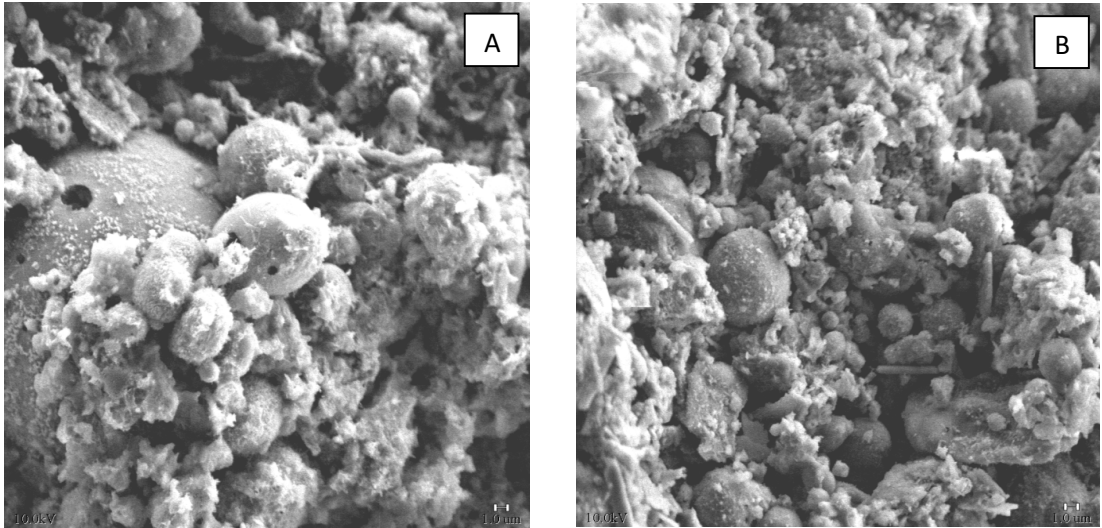
Şekil 6.6 Hafif agregaların XRD sonuçları

6.2.5 Hafif Agregaların SEM Analizi Sonuçları

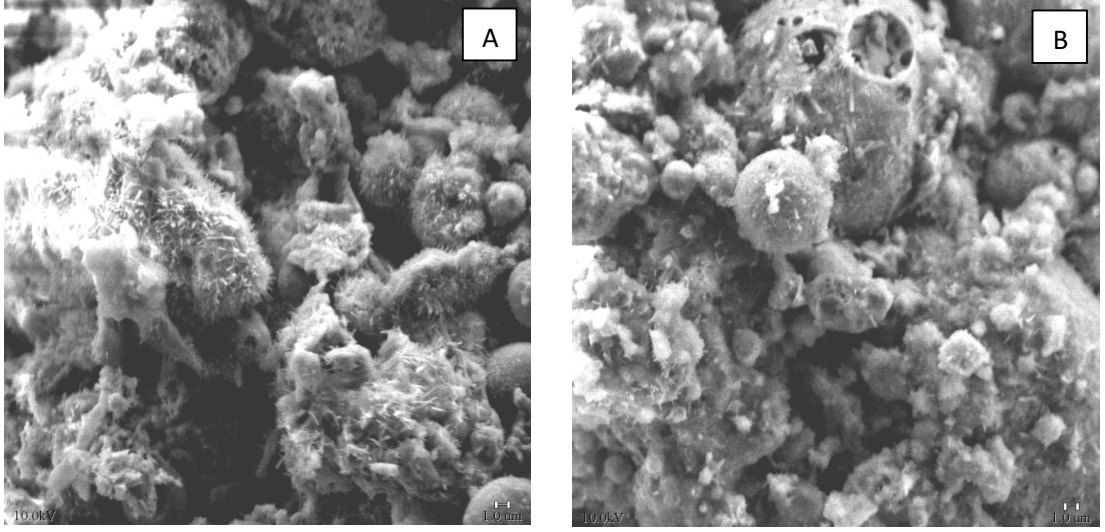
SEM analizi sonucu çıkan SEM görüntüleri Şekil 6.7' de, Şekil 6.8' de ve Şekil 6.9' da gösterilmektedir.



Şekil 6.7 A) 2000x büyütmede Seyitömer uçucu külünün görüntüsü, B) 2000x büyütmede % 0 alçı içerikli numunenin görüntüsü

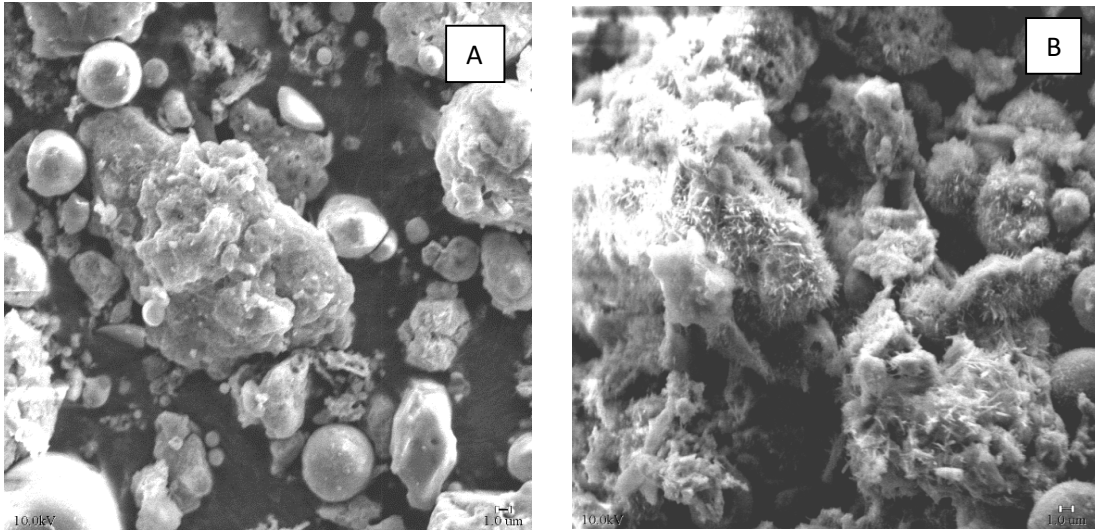


Şekil 6.8 A) 2000x büyütmede % 2 alçı içerikli numunenin görüntüsü, B) 2000x büyütmede % 4 alçı içerikli numunenin görüntüsü



Şekil 6.9 A) 2000x büyütmede % 6 alçı içerikli numunenin görüntüsü, B) 2000x büyütmede % 8 alçı içerikli numunenin görüntüsü

Şekil 6.10’ da alçı ilavesiz karışım ile % 6 alçı ilaveli karışımlardan üretilen hafif agregaların SEM görüntüleri karşılaştırılmaktadır. B nolu % 6 alçı içerikli hafif agreganın SEM görüntüsünde etringit ve tobermorit oluşumları (iğnesel kristaller) gözlemlenmiştir.



Şekil 6.10 A) 2000x büyütmede % 0 alçı içerikli hafif agreganın görüntüsü, B) 2000x büyütmede % 6 alçı içerikli hafif agreganın görüntüsü

Dayanım testleri, XRD analizi ve SEM analizi sonuçları ile desteklenerek, % 88 uçucu kül, % 6 alçı, % 6 kireç karışımının en dayanıklı hafif agregalar olduğu saptanmıştır.

6.2.6 Hafif Agregaların Su Emme Testi Sonuçları

Saptanan en dayanıklı hafif agregalara su emme testi uygulanmıştır. Su emme oranlarını test edebilmek için numune yirmi dört saat boyunca suda bırakılmıştır. Numunenin % 42.16 su emme oranına sahip olduğu hesaplanmıştır. Bu değer izin verilen maksimum su emme değeri olan %18' den fazladır.

6.2.7 Hafif Agregaların Yoğunluk Testi Sonuçları

En dayanıklı hafif agregaların gerçek yoğunluğunun $2,2089 \text{ g/cm}^3$ olduğu saptanmıştır. Su emme testleri sonucunun yardımıyla pelet içerisindeki porların hacmi bulunduktan sonra hafif agregalarının birim hacim ağırlığı ise $1,1436 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasındadır ve hafif agrega şartını sağlamaktadır.

6.3 Hafif Beton Testi Sonuçları

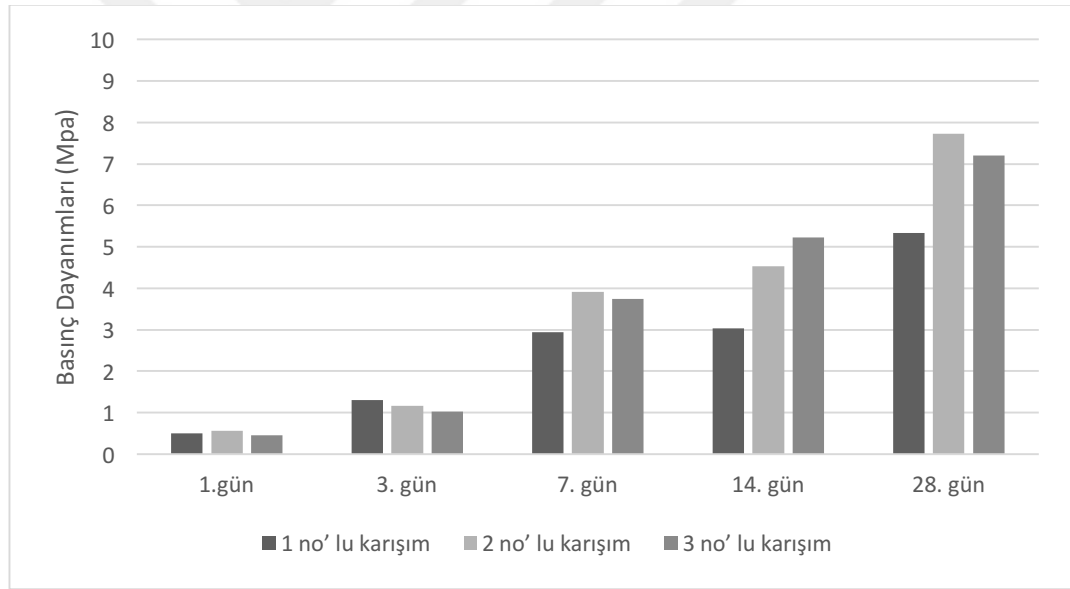
Dayanım testi öncesinde hafif betonların yaşken ve kuruyken birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır. Yaş birim hacim ağırlıkları ortalama $1,47 \text{ g/cm}^3$, kuru birim hacim ağırlıkları ise ortalama $1,25 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur.

Hafif beton üretiminde 1 numaralı, 2 numaralı ve 3 numaralı karışımın çimento miktarları ağırlık yüzdeleri olarak sırasıyla % 16, % 20 ve % 24 olarak belirlenmiştir. Hafif betonun tek eksenli basınç dayanımı test verileri Tablo 6.5' te gösterilmiştir.

Tablo 6.5 Hafif betonların tek eksenli basınç dayanım testi sonuçları

	1 no' lu karışım (MPa)	2 no' lu karışım (MPa)	3 no' lu karışım (MPa)
1.gün	0,50	0,57	0,46
3. gün	1,31	1,17	1,03
7. gün	2,94	3,91	3,74
14. gün	3,04	4,54	5,22
28. gün	5,33	7,73	7,21

Basınç dayanım testlerinde en yüksek dayanımı gösteren karışım, Şekil 6.11' deki grafikten belirlenmiştir. Görüldüğü gibi 28. gündeki eğilme dayanımı sonuçları diğer günlere göre yüksektir. 2 no' lu karışımın, diğer karışımlara göre daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.11 Hafif betonların basınç dayanım testi sonuçlarının karşılaştırılması

Üretilen hafif beton numunesinin kesiti ise Şekil 6.12' de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, hafif beton dökülürken sıkıştırma işleminin yapılmasına rağmen, hafif betonun içinde poroziteler mevcuttur.



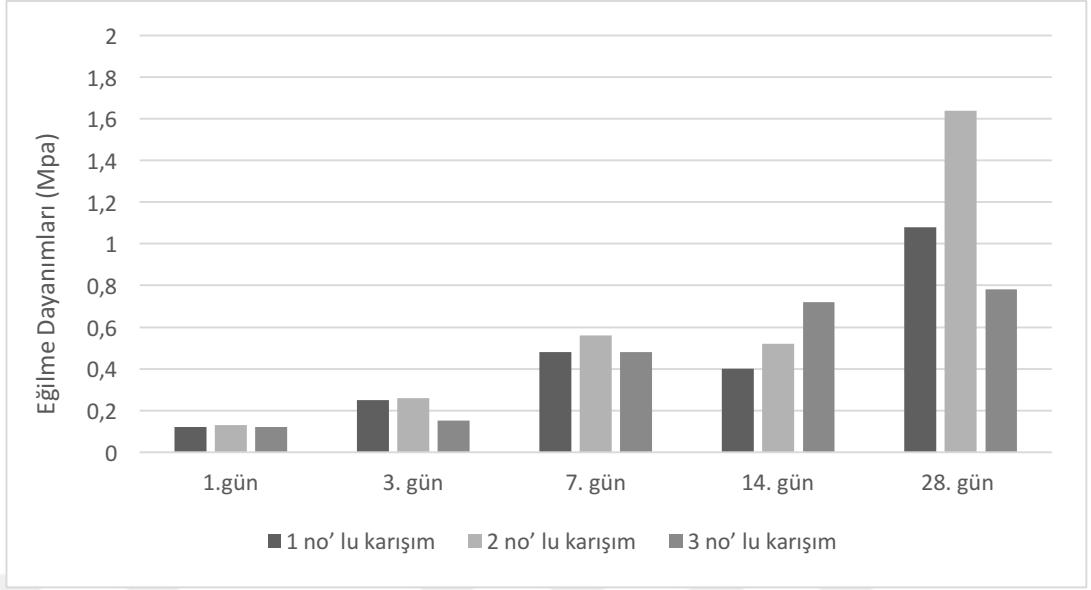
Şekil 6.12 Hafif beton numunesinin kesiti

Hafif betonun eğilme dayanım testi sonuçları Tablo 6.6' da verilmiştir.

Tablo 6.6 Hafif betonların eğilme dayanım testi sonuçları

	1 no' lu karışım (MPa)	2 no' lu karışım (MPa)	3 no' lu karışım (MPa)
1.gün	0,12	0,13	0,12
3. gün	0,25	0,26	0,15
7. gün	0,48	0,56	0,48
14. gün	0,40	0,52	0,72
28. gün	1,08	1,64	0,78

Eğilme dayanım testlerinde en yüksek dayanımı gösteren karışım ise, Şekil 6.13' teki grafikten belirlenmiştir. Görüldüğü üzere 28. gündeki eğilme dayanımı sonuçları diğer günlere göre yüksektir. 2 no' lu karışımın, diğer karışımlara göre eğilme dayanımı sonuçları daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 6.13 Hafif betonların eğilme dayanım testi sonuçlarının karşılaştırılması

Hafif beton numunesinin eğilme dayanım testi sonrası kırılma yüzeyi Şekil 6.14' te gösterilmiştir.



Şekil 6.14 Hafif beton numunesinin eğilme dayanım testi sonrası kırılma yüzeyi

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Seyitömer uçucu külünün elek analizi, kimyasal analizi ve mineralojik analizleri yapılmıştır. Elek analizlerine göre d_{80} ' i 100 mikronun altında olduğu saptanan uçucu külün mineralojik analizlerine göre kuvars, mullit, magnesioferrit, hematit kristalleri ve minör olarak alkali feldispat mineralleri tespit edilmiştir. Yapıları camsı faz şeklindedir. Kimyasal analizine göre Seyitömer uçucu külü ASTM C 618'e göre $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı % 87,02 olup % 70'in üzerinde ve CaO ' in % 10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir. TS EN 197-1'e göre V sınıfına girmektedir.

Farklı oranlarda uçucu kül, kireç ve alçı karışımları ile üretilen hafif agregaların nem tayini testi, düşme ve yaş dayanım testi, basınç dayanım testi, XRD analizi, SEM analizi, su emme testi ve yoğunluk test sonuçlarına göre üretilen hafif agregalarda % 23,20 nem tespit edilmiştir. Sadece alçı katkısız üretilen hafif agregalara yapılan düşme testi sonucu hafif agregaların tane boyutu küçüldükçe düşme sayılarının arttığı gözlemlenmiştir. Yaklaşık 30 mm boyutlarındaki hafif agregaların düşme sayıları ortalama 2,5 iken 4 mm boyutlarındaki hafif agregaların düşme sayısı 5' e yakındır. Üretim esnasında hafif agregaların nakliyesi bantlarla sağlandığından hafif agregaların yaklaşık yarım metre yükseklikten düşmeye dayanıklı olması gerekmektedir. Yaş dayanım testinde aksine hafif agregaların tane boyutu küçüldükçe yaş dayanımları azaldığı gözlemlenmektedir. Yaklaşık 25 mm boyutlarındaki hafif agregaların yaş dayanımları ortalama $1,3 \text{ kgf/cm}^2$ iken 4 mm boyutlarındaki hafif agregaların yaş dayanımları $0,20 \text{ kgf/cm}^2$ ' nin altındadır. Hafif agregaların basınç dayanım testi sonuçlarına bakıldığında % 6 alçı katkılı hafif agregaların maksimum dayanım gösterdiği görülmektedir. Numunelerde alçı miktarı arttıkça eklenen kireç miktarı azalmaktadır. Bu nedenle düşük kireç oranlı % 8 alçılı hafif agreganın basınç dayanımları, her yaşta $1,5 \text{ MPa}$ ' in altında gözlemlenmiştir. Hafif agregaların XRD analizinde en çok % 6 alçı içerikli hafif agregada etringit ve tobermorit oluşumları gözlemlenmiştir. Kullanılan jips (alçı) ve kireç % 6 alçı içerikli numunede tamamen

reaksiyona girmektedir. % 6 alçı içerikli hafif agreganın SEM görüntüsünde etringit ve tobermorit oluşumları (iğnesel kristaller) gözlemlenmiştir.

Dayanım testleri, XRD analizi ve SEM analizi sonuçlarına dayanarak, % 88 uçucu kül, % 6 alçı, % 6 kireç karışımının ortalama 65 kgf/cm^2 ile en dayanıklı hafif agregalar olduğu saptanmıştır.

En dayanıklı seçilen hafif agregaların su emme testi sonucunda % 42,16 su emme oranı tespit edilmiştir. Hafif agregalarda su emme oranı için herhangi bir sınır değer ya da şart yoktur. Hafif agregaların yoğunluğu düştükçe su emme oranının artması doğal karşılanmaktadır. Bu yüzden üretilen hafif agrega ve hafif betonlarda su emme oranının fazla çıkması normaldir.

En dayanıklı hafif agregaların gerçek yoğunluğunun $2,2089 \text{ g/cm}^3$ olduğu saptanmıştır. Su emme testleri sonucunun yardımıyla pelet içerisindeki porların hacmi bulunduktan sonra hafif agregalarının birim hacim ağırlığı ise $1,1436 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır.

Dayanım testleri öncesinde hafif betonların yaş ve kuru birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır. Yaş birim hacim ağırlıkları ortalama $1,47 \text{ g/cm}^3$, kuru birim hacim ağırlıkları ise ortalama $1,25 \text{ g/cm}^3$ tespit edilmiştir. Üretilen hafif agrega ve hafif betonların birim hacim ağırlık değerleri 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasındadır. Bu nedenle TS EN 206-1 standartına göre hafif agrega ve hafif beton şartını sağlamaktadırlar.

	Üretilen Hafif Beton	Hafif Beton Standartları	Değerler	Sınıfı
Birim hacim ağırlık	1250 kg/m^3	TS EN 206-1	$>800 \text{ kg/m}^3$ ve $< 2000 \text{ kg/m}^3$	D 1,4 sınıfı
Basınç dayanımı	7,8 MPa	TS EN 206-1	Min 9 MPa	LC 8/9 sınıfı

Üretilen hafif betonların başlıca özellikleri ve hafif beton standartlarıyla karşılaştırılması yukarıdaki çizelgede verilmiştir. TS EN 206-1 standartına göre hafif betonlar tespit edilen maksimum değer olan 7,8 MPa ile LC 8/9 hafif beton sınıfına girmektedir.

Hafif betonların tek eksenli basınç dayanım testi ve eğilme dayanım testlerine göre en yüksek dayanımı gösteren karışım % 20 çimento katkılı hafif beton olmuştur.

Şekil 6.14' e göre hafif beton numunesinin eğilme dayanım testi sonrası kırılma yüzeyi incelendiğinde hafif agregaların basınçtan etkilenmediği ve yüzeyleri boyunca kırıldığı görülmüştür.

Hafif beton numunesinin kesitine bakıldığında, hafif beton dökülürken sıkıştırma işleminin yapılmasına rağmen, hafif betonun içinde hala poroziteler olduğu görülmektedir. Bu porozitelerin azalması ile ilgili bir çalışma yapıp hafif betonların daha dayanıklı olması sağlanabilir.

Üretilen hafif betonların basınç ve eğilme dayanımlarına bakarak, taşıyıcı hafif beton olma özelliği taşımadığı görülmektedir. Ancak, hafif olduklarından ötürü binaların taşıyıcı olmayan kısımlarında kullanılabilir.

Üretilen hafif betonların basınç dayanımları 5 MPa' dan yüksek olduğu için Alçıpan, Şap beton, Gaz beton gibi betonların yerine kullanılabilir. Ek olarak yığma yapılarda duvar veya blok elemanı olarak da tercih edilebilir.

Etringit ve tobermorit oluşumunu arttırmak için üretilen hafif agregalara yüksek sıcaklıkta kürlenme önerilebilir. Kürlenme yapılan hafif agregalarla üretilen hafif beton, taşıyıcı hafif beton olma özelliği taşıyabilir.

Üretilen hafif agregaların dayanımları oldukça yüksektir. Elde edilen bu hafif agregalarla üretilen hafif betonlarda matris kısmının güçlendirilmesi önerilebilir. Matris kısmının çimento oranı arttıkça veya su oranı azaldıkça dayanımı artabilir.

Üretilen hafif betonlarda, hafif agregalar ile matris kısmı tutunmamaktadır. İkinci bir çalışmada hafif agregaların yüzeyine kumlama yapıp pürüzlendirilirse hafif betonların dayanımı daha artabilir.

Bu çalışmada geliştirilen hafif agrega tipinin ekonomiye katma değer getirecek bir ürün olarak inşaat sektöründe kullanılabileceği ön görülmektedir. Ekonomik değerinin yanı sıra termik santraller için yıllık 15 milyon tondan fazla artık olarak ortaya çıkan ve depolanan, çevresel açıdan bir sorun teşkil eden uçucu küllerin önemli bir kısmının değerlendirilmesi atık yönetimi bakımından katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 213R-03 (2003). *Guide for structural lightweight aggregate concrete*, American Concrete Institute, ACI.
- Ağar, E. ve Taşdemir, Y. (2007). *Silindirle sıkıştırılabilen beton yollar, Türkiye hazır beton birliği*, 10 Mayıs 2015, <http://www.thbb.org/Article.aspx?ID=4>.
- Ağar, E. (2007). *Seyitömer termik santral uçucu küllerinin yapı sektöründe kullanılabilirliğinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Aruntaş, H.Y. (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli, *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21, 1, 193-203.
- 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.
- Ateş, E. (2000). *Hafif betonun ve betonarme çatı plak elemanları üzerine araştırma*, Bitirme Projesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul.
- Atiş, C. D., Tartıcı, H., Sevim, U. K., Özcan, F., Akçaözoğlu, K. ve Yüzgeç, C. (2002). Afşin-Elbistan uçucu külünün beton katkısı olarak kullanılabilirliği, 5. *Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi*, ACE, İTÜ, İstanbul, 161-168.
- Bentli, D., Uyanık, A.O., Demir, U., Şahbaz, O. ve Çelik, M.S. (2005). Seyitömer termik santrali uçucu küllerinin tuğla katkı hammaddesi olarak kullanımı, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, s.385-389, İzmir.

Ceylan, H. ve Saraç, M.S. (2006). Farklı pomza agrega türlerinden elde edilen hafif betonun sıcaklık etkisindeki bazı özellikleri üzerine bir araştırma, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10, 3, 413-421.

Çelikler Holding (2015). *Seyitömer Termik Santrali hakkında bilgi*, 13 Kasım 2015, http://celiklerholding.net/grup-sirketleri_2/celikler-seyitomer.

Çiçek, T. ve Tanrıverdi, M. (2007). Lime based steam autoclaved fly ash bricks, *Construction and Building Materials*, 21, 6, 1295-1300.

Çiçek, T. ve Tanrıverdi, M. (2014). *Buharlı otoklavda uçucu kül ve kireçten tuğla üretiminde optimum proses şartlarının pilot çapta belirlenmesi ve endüstriyel boyutta uygulamasının araştırılması*, Tübitak Projesi, Program kodu 1001, Proje No. 111M694.

Çimentaş (2016). *42,5R çimentosunun özellikleri*, 13 Ekim 2016, <http://www.cimentas.com/index.php/tr/products>.

Davies, D.R. ve Kitchener, J.N. (1996). Massive use of pulverised fuel ash in concrete for the construction of a UK power station, *Waste Management*, 16, 1-3, 169-180.

Demirboğa, R. (1999). *Silis dumanı ve uçucu külün perlit ve pomza ile üretilen hafif beton özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Dikici, T. (2010). *Taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Durmuş, A., Arslaner, M., Hüsem, M. ve Kolaylı, H. (1996). *Karadeniz bölgesi hafif agrega yataklarının belirlenmesi ve bunların yekpare ve prefabrike beton yapılarda kullanılabilirlik ve yararlarının araştırılması*, Araştırma Projesi Raporu, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Trabzon.

Elektrik Üretim A.Ş. (b.t.). *Türkiye’ de bulunan termik santraller*, 5 Kasım 2015
<http://www.euas.com/>.

Enerji Atlası (2015). *Türkiye’ deki kömürle çalışan termik santraller*, 15 Kasım 2015,
<http://www.enerjiatlası.com/komur/>.

Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*. 1. Baskı, Ankara, Türkiye: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.

Erdoğan, T. Y. (2007). *Beton*. 2. Baskı, Ankara, Türkiye: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.

Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H. (2005). Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, İzmir, Türkiye, 419-423.

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.

Koçkal, N. U. ve Özturan, T. (2007). Sinterleme sıcaklığının uçucu kül hafif agregaların özelliklerine etkisi, *7. Ulusal Beton Kongresi*, Maya Basın Yayını, 133-143.

Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete*, İngiltere: Addison Wesley Longman Limited.

- Öz, V. (2007). *Hafif agregalı blok üretiminde Yatağan uçucu külünün etkisinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Özturan, T. (1991). Beton üretiminde uçucu kül kullanımının irdelenmesi, *TMMOB Türkiye İnşaat Mühendisliği XI. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, 1*, İstanbul.
- Temiz, H. ve Akçakale, A.H. (2014). Hafif agregalı betonun mühendislik özelliklerinin araştırılması, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 4, 2*, 7-20.
- Tokyay, M. (1993). Betonda uçucu kül kullanımı, *Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanımı Sempozyumu*, Ankara, 29-36.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K. (1998). *Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu*, TÇMB/AR-GE/Y 98.2, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Topçu, İ.B. ve Kara, İ. (2009). Eskişehir azot fabrikası cürufu ve termik santral küllerinden hafif duvar bloğu üretilmesi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, XXII, 2*.
- Topçu, İ.B. ve Uygunoğlu, T. (2007). Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete, *Building and Environment, 42*, 4108-4116.
- TS EN 206-1 (2002). *Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluğu*, 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 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, Mühendislik Fakültesi, İzmir.

Türkel, S. ve Kadiroğlu, B. (2007), Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 13, 3, 353-359.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A. (2009). *Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği / AR-GE Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

Türkiye Hazır Beton Birliği (2016). *Hafif agrega*, 20 Ekim 2016, <http://www.thbb.org/teknik-bilgiler/agrega/>.

Uyan, M. (1975). *Beton ve harçlarda kılcallık olayı*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İstanbul.

Uygunoğlu, T. (2008). *Hafif agregalı kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Yeğınobalı, A. (1971), *Uçucu kül, tras ve yüksek fırın cürufunun betonda katkı maddesi olarak kullanılması ve optimum uçucu kül karışım oranlarının tayini*, Tübitak Projesi, Ankara, 187.