

**DOĞAL VE YAPAY PUZOLANLARIN KOMPOZE ÇİMENTO
ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mustafa DAYI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2006
ANKARA**

Mustafa DAYI tarafından hazırlanan DOĞAL VE YAPAY PUZOLANLARIN KOMPOZE ÇİMENTO ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Mustafa DAYI

Doç. Dr. H.Yılmaz ARUNTAŞ
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

Üye : Yrd. Doç. Dr. İ. Özgür YAMAN

Üye :

Üye :

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

**DOĞAL VE YAPAY PUZOLANLARIN KOMPOZE ÇİMENTO ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Mustafa DAYI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2006**

ÖZET

Bu çalışmada, doğal puzolan ile atık malzemelerin çimento üretiminde kullanılabilirliğini araştırılmıştır.

Bu amaçla, Manisa-Gördes zeoliti (Z), Kemerköy uçucu külü (UK) ve atık pencere camı (C) kullanılmıştır. Portland çimentosu klinkerine, üç tip puzolan (Z+UK+C), üçlü karışımlar halinde katılarak kompoze çimentolar üretilmiştir. Çimentolarda öğütme süresi sabit tutulmuş ve puzolanlar çimento ağırlığının %5 ve %10 oranlarında karışıma katılmıştır. Üretilen çimentoların kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özellikleri ile 7, 28, 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları kontrol çimentosu olan PÇ 42,5 ile karşılaştırılmıştır.

CUKKÇ5 tip çimentoların hemen hemen bütün yaşlarda en yüksek dayanımı gösterdiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, üretilen katkı

Çimentoların ilgili Türk Standartlarına uygun olduğunu ve imento retiminde Z, UK ve C'nin katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Bilim Kodu : 714.1.143
Anahtar Kelimeler : Kompoze imento, puzolanlar, zeolit, uçucu kül, atık cam
Sayfa Adedi : 77
Tez Yneticisi : Do.Dr.H. Yılmaz ARUNTAŞ

**INVESTIGATION OF USABILITY OF NATURAL AND ARTIFICIAL
POZZOLANS IN THE CEMENT PRODUCTION**

(M.Sc. Thesis)

Mustafa DAYI

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2006

ABSTRACT

In this study, usability of natural pozzolan and waste materials in the production of cement was investigated.

For this aim, Manisa-Gördes zeolite (Z), Kemerköy fly ash (UK) and pen glass waste (C) were used. Three types of pozzolans (Z+UK+C) were added to Portland cement clinker as ternary mix to produce composite cements. Grinding duration of cements was kept constant and pozzolans were added to mix by 5 % and 10 % of cement weight. Chemical composition and properties, physical properties and tensile and compressive strengths, at the age of 7, 28 and 90 days, of produced cements were compared with control cement PC 42.5.

It was observed that, CUKKÇ5 type cements gave the highest strength at almost all ages. Taken results have shown that, produced composite

cements are convenient to related Turkish Standards and Z, UK and C could be used as an additive material in the production of cement.

Science Code : 714.1.143
Key Words :Composite cement, pozzolans, zeolite, fly ash, waste glass
Page Number : 77
Adviser : Assoc. Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince ilgisini ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ'a, değerli katkıları ile tezimi yönlendiren ve çalışmalarımı teşvik eden Yapı Eğitimi Bölümü öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e ve Yapı Eğitimi Bölümü'nün değerli öğretim üyelerine, deneysel çalışmalarımda yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Serkan SUBAŞI, Arş. Gör. Hayati ULUSU, Arş. Gör. Murat ÇAVUŞ, Arş. Gör. Kürşat YILDIZ, Arş. Gör. Gökhan DURMUŞ ve diğer çalışma arkadaşlarıma, SET Çimento San. Ve Tic. A.Ş.'nin Kalite-Kontrol laboratuvarı çalışanlarına ayrıca meslek hayatım ve çalışmalarım boyunca her türlü desteğiyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiViii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Çimentolar.....	3
2.1.1. Çimentonun tanımı.....	3
2.1.2. Çimentonun tarihçesi.....	3
2.1.3. Çimento hammaddeleri.....	5
2.1.4. Portland çimentoları.....	6
2.1.5. Çimentonun hidratasyonu.....	8
2.2. Puzolanlar ve Puzolanik Tepkimeler.....	12
2.2.1. Puzolanlar.....	12
2.2.1. Puzolanların sınıflandırılması.....	13
2.2.1. Puzolanik aktivite.....	18
2.2.1. Puzolan katkıların beton özelliklerine etkileri.....	20
2.3. Çalışmada Kullanılan Puzolanlar.....	21
2.3.1. Zeolit.....	21

	Sayfa
2.3.2. Uçucu kül.....	29
2.3.3. Cam.....	34
2.4. Puzolanlar İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	42
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	44
3.1. Materyal.....	44
3.1.1. Çimentolar.....	44
3.1.2. Klinker.....	44
3.1.3. Puzolanlar.....	45
3.1.4. Standart kum ve su.....	46
3.2. Metot.....	47
3.2.1. Puzolanik aktivite deneyi.....	47
3.2.2. Çimento karışımlarının hazırlanması ve üretilmesi.....	48
3.2.3. Çimentoların kimyasal analizleri.....	50
3.2.4. Çimentoların fiziksel deneyleri.....	50
3.2.5.Çimentoların dayanım tayini deneyleri.....	56
4. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	60
4.1. Kimyasal Kompozisyon.....	60
4.2. Standart Kıvam Suyu.....	61
4.3. Priz Süreleri.....	62
4.4. Hacim Genleşmesi.....	62
4.5. Tane Büyüklüğü.....	63
4.6. Özgül Ağırlık.....	63
4.7. Özgül Yüzey.....	63

	Sayfa
4.8. Eğilmede Çekme Dayanımı.....	63
4.9. Basınç Dayanımı.....	68
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	72
KAYNAKLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ.....	77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. CaCO ₃ ve kil içeriklerine göre çimento hammaddelerinin adlandırılması.....	6
Çizelge 2.2. Tipik bir portland çimentosunun oksit analizi ve ana bileşen miktarları.....	8
Çizelge 2.3. TS 25 'e göre trasda aranması gereken özellikler.....	20
Çizelge 2.4. Türkiye'de tespit edilmiş olan zeolit yatakları ve türleri.....	29
Çizelge 2.5. ASTM' ye göre uçucu kül sınıfları.....	31
Çizelge 2.6. Değişik termik santral uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları.....	32
Çizelge 2.7. Çeşitli camların bileşimine giren ana madde oranları.....	36
Çizelge 3.1. PÇ 42.5 çimentosu ve klinkerin kimyasal analizleri ve fiziksel özellikleri.....	45
Çizelge 3.3. Puzolanik aktivite deneyi için gerekli malzeme miktarları.....	47
Çizelge 3.4. Puzolanik aktivite deneyinde kullanılan malzeme miktarları.....	47
Çizelge 3.5. Puzolanik aktivite deney sonuçları.....	48
Çizelge 3.6. Katkılı çimentoların karışım oranları ve kullanılan malzeme miktarları.....	49
Çizelge 4.1. PÇ 42,5 ile kompoze çimentoların kimyasal analizleri.....	60

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.2. PÇ 42,5 ile kompoze çimentoların fiziksel özellikleri.....	62
Çizelge 4.3. Eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler.....	64
Çizelge 4.4. Eğilmede çekme dayanımı değerleri bakımından çimento tiplerinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi.....	65
Çizelge 4.5. Eğilmede çekme dayanımı değerlerine ait çoklu karşılaştırma (duncan) testi sonuçları.....	66
Çizelge 4.6. Numune yaşı ile eğilmede çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren regrasyon modelleri.....	67
Çizelge 4.7. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı İstatistikler.....	68
Çizelge 4.8. Basınç dayanımı değerleri bakımından çimento tiplerinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi.....	70
Çizelge 4.9. Basınç dayanımı değerlerine ait çoklu karşılaştırma (duncan) testi sonuçları.....	70
Çizelge 4.10. Numune yaşı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren regrasyon modelleri.....	72

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çimento hamurundaki silika-hidratların muhtemel yapısı.....	10
Şekil 2.2. Doğal Puzolanlar.....	14
Şekil 4.1. Çimentoların standart kıvam suyu değerleri.....	61
Şekil 4.2. Çimentolarda eğilmede çekme dayanımı – numune yaşı ilişkisi.....	65
Şekil 4.3. Numune yaşı ile eğilmede çekme dayanımı arasındaki ilişki.....	68
Şekil 4.4. Ortalama basınç dayanımı değerlerine ait çizgi grafik.....	69
Şekil 4.5. Numune yaşı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	72

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Retsch marka uzun çeneli kırıcı.....	50
Resim 3.2. Otomatik vicat aleti.....	52
Resim 3.3. Alpine marka incelik ölçüm cihazı.....	54
Resim 3.4. Tonindustrie-Seger marka blaine cihazı.....	55
Resim 3.5. Numune kalıbı kür dolabı.....	57
Resim 3.6. Numune kür havuzu.....	58
Resim 3.7. ELE Autotest 250 eğilmede çekme ve basınç deney cihazı.....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

d	Özgül ağırlık (g/cm^3)
S	Özgül yüzey (cm^2/g)
P	Anlamlılık düzeyi
r²	Regrasyon katsayısı

Kısaltmalar

Açıklama

PÇ	Portland çimentosu
Z	Zeolit
C	Atık cam
UK	Uçucu kül
CH	Kalsiyum hidroksit
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
CUKKÇ 5	%5 Atık cam + %5 uçucu kül katkılı çimento
ZUKKÇ 5	%5 Zeolit + %5 uçucu kül katkılı çimento
ZCKÇ 5	%5 Zeolit + %5 atık cam katkılı çimento
CUKKÇ 10	%10 Atık cam + %10 uçucu kül katkılı çimento
ZUKKÇ 10	%10 Zeolit + %10 uçucu kül katkılı çimento
ZCKÇ 10	%10 Zeolit + %10 atık cam katkılı çimento

1. GİRİŞ

Yaklaşık 175 yıldan bu yana Portland çimentoları, tüm dünyada en yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden biri olmuştur. Ancak özellikle 1970'lerdeki enerji krizinden bu yana, Portland çimentolarının yanı sıra alternatif bağlayıcı maddeler veya ikame malzemelerindeki arayış bilimsel ve endüstriyel düzeyde süregelmektedir (1).

Bugün çimento endüstrisini çevre konularında gittikçe ciddileşen sınavlar beklemektedir. Kyoto sözleşmesi gereği, çimento üretiminde CO₂ emisyonunu azaltmak ve daha düşük klinker faktörü olan ancak dayanıklılık problemleri azalmış çimentolar üretmek vardır. Bu aynı zamanda alkali-silika reaksiyonu (ASR), gecikmeli etrengit oluşmasını (GEO) ve dışarıdan gelecek sülfat etkisini hafifletecek çimento üretimi anlamına gelmektedir. Puzolanların, hidrolik çimentoların geleceğinin katma değeri olan ve dost ürünler olduğu söylenebilir (2).

Düşük klinkerli çimento; CO₂ çıkarmayan bileşenler kullanarak katkılı çimento üretmek anlamına gelir. Aynı zamanda, bu yüzyılda inşaat endüstrisinin gittikçe artan ihtiyacını karşılamak üzere, toplam hidrolik çimento arzında da artış sağlanmış olacaktır. Çimento üreticisi açısından katkılı çimento üretimi, az bir yatırım maliyeti ile fabrika kapasitesini artırmaktadır. Bugünkü eğilim, kısmen Portland çimentosu emisyonunu tek bir katkı bileşeni katarak azaltmak yerine, üç veya dört bileşenli katkılı çimentoların üretilmesi yönündedir (2).

Alüminyum ve çelikten sonra üretiminde en fazla enerji gerektiren malzeme Portland çimentosudur. Bunun bilincinde olan çimento ve beton üreticileri, klinkerin bir kısmı yerine mineral katkıları ve özellikle atık ürünler kullanarak katkılı çimento üretimini gerçekleştirmişlerdir. Son yıllarda çimento sanayinde giderek iki veya daha fazla bileşenli kompoze çimento üretimi yapılmaktadır. Bu tür düşük enerji tüketimli çimentoların elde edilmesi, ekonomik avantajları ve kimi zaman da düşük sera etkisi ve bazı endüstriyel atıkların azaltılması şeklindeki ekolojik

etkisiyle çimento endüstrisi açısından oldukça yararlıdır. Bu tür çimentolar, bu açıdan ekolojik çimento olarak da adlandırılmaktadır (2).

Üretimde enerji tasarrufu dolayısıyla ekonomi sağlayan, çevre kirlenmesini azaltan ve çimentoya bazı yeni olumlu özellikler kazandıran etkin bir yöntem, çimentoya klinker öğütülürken veya daha sonra bazı mineral katkıların katılmasıdır. Bu katkıların büyük bir bölümü, ilk zamanlardaki çimentolarda kireçle birlikte kullanılan “puzolanik malzeme” özelliğine sahiptir (3). Bilindiği gibi puzolanlar veya puzolanik malzemeler, çimento ve su karıştırıldığında ortaya çıkan sönmüş kireç (kalsiyum hidroksit) ile reaksiyona girerek ilave bağlayıcı bileşikler oluştururlar (4). Bu şekilde çimentolu ürünlerin zararlı kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı da artırılmaktadır. Demir-çelik endüstrisi yan ürünü olan yüksek fırın cürufu, kömürle çalışan termik santrallerden ortaya çıkan uçucu küller ile ferrokrom endüstrisi yan ürünü olan silis dumanı gibi endüstriyel atıkların kullanımı, teknolojik yönden ve çevre koruması bakımından daha yararlı olmaktadır. “Tras” olarak adlandırılan volkanik formasyonlar da, ülkemizdeki çimento fabrikalarında yaygın olarak kullanılan doğal puzolanik katkı maddeleridir (3).

Bu çalışmanın amacı, doğal puzolan olan zeolit (Z), endüstriyel atık olan uçucu kül (UK) ve atık pencere camının (C) Portland çimentosunda katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Çimentolar

2.1.1. Çimentonun tanımı

Çimento sözcüğü, yontulmuş taş anlamındaki Latince “Caementum” sözcüğünden türetilmiştir. Çimento inşaat teknolojisine göre yapı malzemeleri grubuna giren hidrolik bağlayıcı bir inşaat malzemesidir. Çimentoya özelliklerini kazandıran iki önemli öğeden biri hammadde bileşimi, diğeri ise klinkerin ısısal işlemleridir. Klinker bileşimi, esas olarak hammadde karışımının kompozisyonuna sıkı sıkıya bağlıdır. Ayrıca kullanılan yakıt cinsi ve yakıt içerisinde kül meydana getiren maddeler de klinker bileşimini etkileyen faktörlerdir (5).

Çimento üretimi kompleks bir işlemdir ve büyük tesislere ihtiyaç duyulmaktadır. Çimentonun temel ham maddeleri, kireç taşı ve kildir. Silis, alümin ve demiroksitle birleşme özelliği vardır. Kil, saf olmayan alüminyum, kalsiyum ve demir silikattır. Çimento üretiminde amaç, bu maddeleri belirli oranlarda karıştırmak ve yüksek sıcaklıkta (1350-1500°C) pişirmektir. Yüksek sıcaklıkta temel maddeler değişikliğe uğrar. Kireç taşından CaO, kilden SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ meydana gelir. Bu maddeler yine yüksek sıcaklıkta aralarında birleşerek çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran silikat ve alüminatları meydana getirirler. Çimento üretiminde hammadde olarak, klinkere %3 - 6 oranında alçı taşı (CaSO₄.2H₂O) katılır. Klinker ve alçı taşı birlikte öğütülür. Alçı taşının görevi, çimentoda priz süresini ayarlamaktır. Klinkere öğütme sırasında katkı maddesi olarak %2 - 3 gibi az bir oranda, kireç taşı da katılmaktadır. Kireç taşı klinkerden daha kolay öğütülebilen bir malzemedir. Böylece klinker daha iri, kireç taşı taneleri daha küçük olur ve taneler arasındaki boşlukları doldurarak çimentonun mukavemetini ve işlenebilirliğini artırır, kolay yayılmasını sağlar (5).

2.1.2. Çimentonun tarihçesi

Uygarlığın başlangıcından itibaren insanoğlu taş parçalarını yapıştırıp birleştirecek bir malzeme bulmaya çalıştı. Daha o zamanlarda böyle bir uygulamanın inşaatlara esneklik ve çok yönlülük kazandıracağı anlaşılmıştı. En eski bağlayıcı malzemelerden alan "çamur" bugün hala dünyanın çeşitli ülkelerinde saman ve bitkisel liflerle karıştırılıp duvar elemanlarının üretilmesinde ve bağlayıcılık özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır (5).

Eski Mısırlılar, Keops piramidinin yapımında alçı harcı kullanmışlardır (M.Ö. ~300). Bu, alçı taşının pişirilmesi sonucu mümkün olmuştur. Eski Yunanlılar ve Romalılar killi kalkerleri pişirerek su kireci elde ettiler. Aynı zamanda da bazı volkanik formasyonların ince öğütülüp kireç ve kum ile karıştırıldıklarında kireç harcından daha kuvvetli olmakla kalmayıp suya karşı da daha dayanıklı olan bir malzeme elde edileceğinin bilincine varmışlardı. Bu bağlayıcı malzemelerin karakterleri ancak 18. Yüzyılda anlaşılmaya başlandı (6).

Birkaç öncü çalışmanın ardından, Leeds şehrinde bir yapı ustası olan Joseph Aspdin, 1824 yılında Portland çimentosunun patentini aldı. Sonraları hidrolik çimento kullanımı Avrupa ve Kuzey Amerika'da hızla yayıldı. Çimento üretiminde kullanılan ekipmanın geliştirilmesine başlandı (6).

Döner fırınların geliştirilmesine İngiltere'de 1877 yıllarında başlandı ve ilk başarılı uygulamacı olduğu kabul edilen Fredrick Ransome 1885 yılında döner fırını için patent aldı. Bu o zamanlar için çimento endüstrisinde önemli bir gelişmeydi ancak gerçekten başarılı işlev gören bir döner fırın yıllar sonra gerçekleşti. Ransome'ın fırınlarından sonra bazı Amerika'lı mühendisler bu buluşu geliştirmeye devam ettiler. Amerika'da ekonomik olarak çalışan döner fırın Atlas Çimento Şirketi'nden Hurry ve Seaman tarafından geliştirilerek 1895 yılında üretime başladı (6).

Portland çimentosunun üretimi arttıkça hammadde ve çimentolarla ilgili deney yöntemleri ve karakterizasyonlar üzerine çalışmalar başladı. Çok sayıda laboratuvar çalışmasından sonra 1900'lerin başlarında başlıca çimento deneyleri büyük ölçüde standartlaşmış oldu. O zamandan beri bunların bir bölümü gözden geçirilip değiştirildi ve bütün dünyada çimento standartlarıyla yeni deneyler eklendi (6).

2.1.3. Çimento hammaddeleri

Ana hammaddeler

Kireçtaşı (kalker)

Kimyasal bileşiminde en az %90 CaCO_3 (kalsiyum karbonat) bulunan kayalara kalker yada kireç taşı adı verilmektedir. Kalkerin minerolojik incelemesinde saf halde kalsit ve çok az miktarda aragonit kristallerinden oluştuğu görülür. Kalkerin sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı $2,5\text{-}2,7 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır (7).

Marn

Kalker ve kilin doğada, %50–70 oranında kalker ve %30–50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaca marn denilmektedir. Oluşum bakımından tamamı ile sedimanter olup, diyajenez geçirmiş genellikle düzenli tabakalı olarak bulunur. Marn oluşumu için, daha çok tektonik ve orojenik hareketlerin durulduğu, sakin ortamlar daha uygundur. Çimento klinkeri ortalama %70 kalker ve %30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Marn doğal olarak bu bileşimi taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özellikte bulunduğu için ideal çimento hammaddesidir. Ayrıca kalkere göre daha yumuşak olması nedeniyle kolay öğütülebilmekte, kırma-öğütme işlemleri sırasında enerji tüketimi düşük olmaktadır (7).

Çizelge 2.1. CaCO_3 ve kil içeriklerine göre çimento hammaddelerinin adlandırılması (7)

Hammadde	CaCO_3 (%)	Kil (%)
Kalker	96-100	0-4
Marnlı kalker	90-96	4-10
Kalkerli marn	75-90	10-25
Marn	40-75	25-60
Killi marn	10-40	60-90
Marnlı kil	4-10	90-96
Kil	0-4	96-100

Kil

Kil terimi, endüstriyel alanda kesin sınırlarla saptanarak tanımlanmasına rağmen hammadde olarak çeşitli alanlarda çok geniş kullanımı vardır. Kil, yerbilimleri tarafından killi kayaç ve killer olarak iki anlamda kullanılmaktadır. Bu açıdan kil minerallerinden oluşmuş kayaçlar olarak tanımlandığı gibi bazı kaynaklarda tane boyutları 2 mikron'dan daha küçük parçacıklardan oluşmuş kayaçlar veya çökeller olarak da tanımlanmaktadır. Gerçek anlamda kil tanımı, mineralojik bileşiminde %90'a kadar kil mineralleri bulunan kayaç olarak yapılmaktadır. Kil minerallerinin temel özelliği, kimyasal bileşimlerinde alüminyum oksit (Al_2O_3) bulunması ve sulu alüminyum silikatlardan meydana gelmiş olmasıdır. Demir, alkaliler ve alkali topraklarda değişik miktarlarda yer almaktadır (7).

2.1.4. Portland çimentoları (PÇ)

Yapısal amaçlarla kullanılan çimentolar, agregaları (kum, çakıl, kırma taş) bir arada tutmak için kullanılan, esas itibarıyla silisli ve kalkerli bağlayıcılardır. Beton yapımında kullanılan çimentolar ise, su içinde priz alma ve sertleşme

özellikleri nedeniyle hidrolik çimentolar olarak adlandırılır. PÇ, hidrolik çimentolar gurubunun en önemli üyesidir (8).

PÇ, kalkerli ve killi hammaddelerin döner fırında pişirilmesi sonucunda elde edilen klinkere, az miktar alçı ilave edilerek 0.5 - 80 µm boyutlarında öğütülmesi suretiyle elde edilir. Kimyasal açıdan ana bileşenlerini, kristal yapıdaki kalsiyum silikatlar ve alüminatlar oluşturur.

Döner fırına verilen hammadde karışımı, esas olarak kireç, silika, alümina ve demir oksitten meydana gelir. Bu oksitler, yüksek sıcaklıkta birbirleriyle reaksiyona girerek daha kompleks bileşenler oluştururlar (8).

PÇ’de dört ana bileşen mevcuttur:

- Trikalsiyum silikat
- Dikalsiyum silikat
- Trikalsiyum alüminat
- Tetrakalsiyum alüminoferrit.

Bu bileşenler, çimento kimyasında kullanılan kısaltmalarla, sırasıyla C_3S ($3CaO.SiO_2$), C_2S ($2CaO.SiO_2$), C_3A ($3CaO.Al_2O_3$) ve C_4AF ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) olarak gösterilir(9).

Çimento bileşenleri, basit oksitler halinde bulunmamakla birlikte, kimyasal analiz sonuçları oksit miktarları olarak verilir. Bu oksit analizinden elde edilen değerler, bir çimentodaki ana bileşenlerin miktarlarını, “Bogue Deklemleri” adı verilen formüller vasıtasıyla hesaplamakta kullanılır. Tipik bir PÇ’nin kimyasal analizi ve Bogue denklemleri ile hesaplanan ana bileşen miktarları Çizelge 2.2’de verilmiştir (9).

Çizelge 2.2. Tipik bir portland çimentosunun oksit analizi ve ana bileşen miktarları (9)

Oksitler	Çimento kimyasına göre sembolü	Miktarı %	Ana bileşen miktarı
CaO	C	63	
SiO ₂	S	20	C ₃ S=54.1
Al ₂ O ₃	A	6	C ₂ S=16.6
Fe ₂ O ₃	F	3	C ₃ A=10.8
MgO	M	1.5	C ₄ AF=9.1
SO ₃	Ŝ	2	
Na ₂ O+K ₂ O	N+K	1	
Kızdırma kaybı	K.K.	2	
Çözünmeyen Kalıntı	Ç.K.	0.5	
Diğer	-	1	

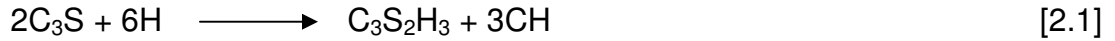
2.1.5. Çimentonun hidratasyonu

Çimento ve su birleştiği anda, her anabileşen su ile ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve hidratasyon sonunda her anabileşen tarafından değişik hidratasyon ürünleri oluşmaktadır. Bu reaksiyonların etkisiyle çimento hamuru katılaşmakta (Priz almakta) ve sertleşmektedir (dayanım kazanmaktadır). Çimento hamurunun özellikleri, kimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan değişik özelliklerdeki hidratasyon ürünlerinin çimento hamurunun içerisinde ne oranda yer almış oldukları tarafından belirlenmektedir.

Çimento ve suyun karılmasıyla elde edilen çimento hamurunun hacmi, kullanılan çimentonun ve suyun hacimlerinin toplamına eşittir. Anabileşenlerin hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan ürünlerin bu hacim içerisinde yer aldığı, yani, çimento hamurunun hacminin değişmediği varsayılmaktadır (8, 9).

C₃S ve C₂S (Kalsiyum Silikatların) Hidratasyonu

Trikalsiyum silikat (C₃S) ile su arasındaki reaksiyon ve dikalsiyum silikat (C₂S) ile su arasındaki reaksiyon aşağıdaki denklemlerle gösterilmektedir:



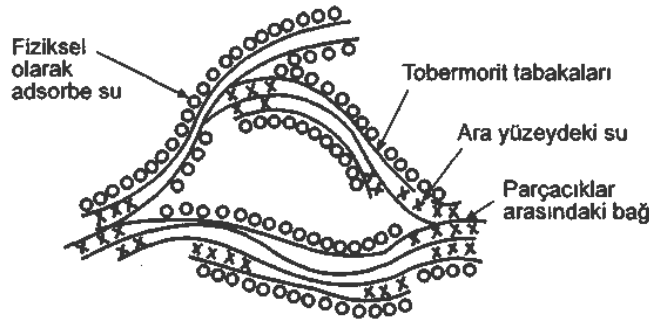
Gerek C₃S gerekse C₂S, bir miktar su ile birleştğinde, ortaya çıkan hidratasyon ürünlerinin türü aynıdır: CH ve C₃S₂H₃.

C₃S₂H₃ (3CaO.2SiO₂.3H₂O), “tobermorit” olarak adlandırılmaktadır. Tobermorit ismi, bu hidratasyon ürününün, doğada aynı isimle anılan bir minerale benzerliğinden dolayı verilmiştir. Kalsiyum-silika-hidrat olarak ortaya çıkan hidratasyon ürünü, son yıllarda, sadece C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jeli olarak adlandırılmaktadır (9).

Çimento hamurunun kazandığı dayanım, C₃S ve C₂S anabileşenlerinin hidratasyonu ile ortaya çıkan C-S-H jellerinin miktarına bağlıdır. Doğal olarak, C-S-H jellerinin tümü, bir anda meydana gelmemektedir. Hidratasyon olayı devam ettikçe, C-S-H jellerinin üretimi de devam etmekte ve çimento hamurunun dayanımı artmaktadır. C₃S anabileşeninin hidratasyonu, ilk zamanlarda C₂S anabileşeninin hidratasyonundan daha hızlı yer aldığı için, çimentodaki dayanım artışına C₃S’nin ilk zamanlardaki katkısı daha çoktur.

C-S-H jelleri, zayıf kristalli (amorfa yakın) kolloidal parçacıklardan oluşmaktadır. Lif (fiber) şekilli bu kristallerin dağılımında bir düzen yoktur. C-S-H jelleri, bir dantel veya dokuma parçası gibi iç içe büyümüş tarzda yer almaktadır. Elektron mikroskopla incelendiğinde, C-S-H jelleri, üzerinde küçük dikenleri olan bir kese görünümündedir. C-S-H jellerinin yapısının bir parçası olarak, kolloidal tabakaya adsorbe durumda su yer almaktadır. Katı

koloidal tabakalarının arasında çok küçük boyutlu jel boşlukları bulunmaktadır (9).



Şekil 2.1. Çimento hamurundaki silika-hidratların muhtemel yapısı (11)

C₃A'nın Hidratasyonu

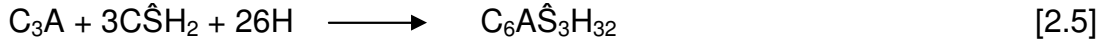
C₃A ve su arasındaki reaksiyonlar çok büyük bir hızla yer almakta ve kalsiyum-alümina-hidratların oluşmasına yol açmaktadır:



Yukarıdaki kalsiyum-alümina-hidratlar kararlı değildir ve kısa sürede kararlı formdaki kübik hidrogarnet (C₃AH₆) durumuna dönüşmektedir. C₃A ile su arasındaki reaksiyonlar, çok büyük miktarda ısı açığa çıkartacak tarzda ve büyük bir hızla olduğundan, çimento hamurunun “ani priz”ine yol açmaktadır. Ani priz sonucunda çimento hamuru derhal katılaşma gösterdiği gibi, önemli sayılabilecek bir dayanım da kazanmamaktadır (12).

Çimento hamurunun ani priz yapmasını önlemek amacıyla, çimento üretimi esnasında, klinkere bir miktar (%3–6) alçıtaşı katılmakta ve bu iki malzeme birlikte öğütülmektedir. Çimentonun yapısında yer alan C₂ŜH₂ (Alçıtaşı), C₃A ve su ile birlikte reaksiyona girmekte, böylece reaksiyon hızını yavaşlatmaktadır.

C_3A , su ve alçıtaşı arasında aşağıdaki reaksiyonlar yer alabilmektedir (12):



Yukarıdaki denklemlerden görülebileceği gibi, C_3A , su ve alçıtaşının reaksiyonları ile çimento hamurunun içerisinde hem bir miktar $C_4A\hat{S}H_{12}$, hem de $C_6A\hat{S}_3H_{32}$ ürünleri oluşabilmektedir. $C_4A\hat{S}H_{12}$ (kalsiyum-alümino-monosülfhidrat) ürünü, bünyesine 12 molekül su alarak oluşmaktadır. Bu kristalin oluşması, çimento hamurunun içerisinde bir miktar genleşmeye yol açmaktadır (12).

$C_6A\hat{S}_3H_{32}$ (kalsiyum-alümino-trisülfhidrat), “Candlot tuzu”, veya daha popüler ismi ile “Etringit” olarak anılmaktadır. $C_6A\hat{S}_3H_{32}$ için verilen etringit ismi, bu ürünün doğada aynı isimle anılan bir minerale benzerliğinden gelmektedir. Hekzagonal kesitli ve çubuk şekilli etringit kristalleri oldukça karardır. Bünyesinde 32 molekül su bulunduran etringitin oluşması, çimento hamurunun içerisinde çok büyük genleşmelerin yer almasına yol açmaktadır. Çimento üretimi için klinkerle birlikte gereğinden daha çok alçıtaşı kullanıldığı takdirde, fazla miktardaki SO_3 , çimento hamurunda etringit oluşmasına ve hasara yol açmaktadır (12).

C_4AF 'nin Hidratasyonu

C_4AF anabileşeninin hidratasyonunun, C_3A anabileşeninin gösterdiği hidratasyona benzer olduğu belirtilmektedir. C_3A nın hidratasyonundaki bir kısım alüminanın yerini demiroksit almaktadır. Ortaya çıkan kalsiyum-alümino-sülfhidrat ürünleri $C_4(A, F)\hat{S}H_{12}$ ve $C_6(A, F)\hat{S}_3H_{32}$ kompozisyonuna sahip olmaktadır. Bu ürünlerin yanı sıra, bir miktar $(A, F)H_3$ meydana gelmektedir. Ortamdaki demir oksitin fazlalaşması, reaksiyonun daha yavaş yer almasına yol açmaktadır (12).

Çimento üretiminde alçıtaşı kullanılmadığı veya gereğinden az kullanıldığı takdirde, C_4AF anabileşeninin hidratasyonu, C_3A anabileşeninin hidratasyonu kadar şiddetli olmasa bile oldukça hızlıdır ve açığa büyük miktarda ısı çıkaran türdendir; ani prize yol açabilmektedir. Çimento üretiminde alçıtaşı kullanılmış olması, ani prizi önlemektedir (12).

C_3A oranı düşük fakat C_4AF oranı yüksek olan çimentolarla yapılan betonların, sülfat hücumlarına oldukça dayanıklı olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni tam olarak bilinmemekle beraber, muhtemel açıklama şu şekilde yapılabilmektedir: Demir iyonu içeren kalsiyum-alümino-monosülfat ürünleri, sülfatlı ortamda etrenjit haline dönüşmemektedir veya $(A, F)H_3$ ürününün oluşmuş olması, daha çok sülfatın bulunduğu ortamda etrenjit oluşmasını önleyebilmektedir (12).

2.2. Puzolanlar ve Puzolanik Tepkimeler

2.2.1. Puzolanlar

Puzolanlar, “kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler” olarak tanımlanmaktadır. Puzolanların yapısında, büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yanı sıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir (4, 13, 14).

“Puzolan” ismi, İtalya’ daki Vezüv yanardağının eteklerinde bulunan “Puzzuoli” isimli kasabanın isminden alınmıştır. Milattan yaklaşık 100 yıl önce, eski Romalılar, Puzzuoli kasabasının civarında volkanik kül ile söndürülmüş kirecin suyla birlikte karılmasıyla elde edilen malzemenin hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterdiğini fark etmişlerdir. O nedenle, su altında

sertleşme gösterebilen bu malzeme, “puzolan” ismiyle anılmaya başlanmıştır (15).

Bilim adamlarının Türkiye’ de Çatalhöyük’ teki eski yapılar üzerinde yaptıkları incelemelerde, bu yapılarda kullanılan harcın 8000 yıl eski olduğu ortaya çıkarılmıştır (16). Bilindiği gibi, sadece kireç veya alçıdan elde edilen bağlayıcılar, özellikle sulu ortam koşullarına karşı dayanıklı değildirler ve bu bağlayıcıların bu kadar uzun süre dayanıklılık göstermeleri mümkün değildir. O nedenle, 8000 yıl ömürlü harcın muhtemelen puzolanik malzemelerle yapıldığı anlaşılmaktadır. Bir başka deyişle, Romalılardan çok uzun yıllar önce de, puzolanik malzemeler eski insanlar tarafından bir şekilde kullanım bulmuşlardır (17).

2.2.2. Puzolanların sınıflandırılması

Puzolanlar, oluşum şekillerine göre doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılır. Doğal ya da yapay bütün puzolanlar, reaksiyon kapasiteleri açısından üç bileşenden meydana gelirler (18):

- Aktif tertip maddeleri: Az ya da çok değişmiş cam fazları, opal, silisli toprak, zeolitler.
- Atıl bileşenler: Zeolitlerden farklılık gösteren kristal fazları (augit, piroksen ve saf çini).
- Zararlı (istenmeyen) bileşenler: Organik maddeler, kalay ve karbon maddeleri.

Doğal puzolanlar

Doğal puzolanlar, doğada volkanik kütlelerin bulunduğu yerlerde görülür. Her puzolanın kimyasal yapısı, aktivitesi, bulunduğu bölgeye göre değişir. Doğal

puzolanlara örnek olarak volkanik tüfler, tras, diyatomit veya diyatome toprağı, pomza taşı verilebilir. Doğal puzolanlar çoğunlukla genç volkanizma ürünüdür (18, 19). Şekil 2.2'de doğal puzolanların çeşitleri yer almıştır.



Şekil 2.2. Doğal Puzolanlar (18)

Doğal puzolanların çoğu piroklastik kayalardır. Piroklastik kayalar bir volkanik patlama sırasında volkan bacasından havaya fırlatılır. Havaya fırlatılan volkanik parçacıklar zamanla yatak oluştururlar. Piroklastik kayalar oluşumları sırasındaki koşulların bir sonucu olarak iki önemli karakteristik özelliğe sahiptir:

- ✓ Maddelerin hızlı soğumasına bağlı olarak fışkırtma sürecinde oluşan sıvı kristalleşmez ve volkanik cam olarak katılaşır.
- ✓ Yeryüzüne yaklaştığında basınç azalır ve gazların (genellikle H_2O) serbest kalmasına neden olur.

Boşluklu ve kabarcıklı bir yapı meydana gelir. Bu yapı ya olduğu gibi kalır veya serbest kalan gazların patlayıcı etkisiyle az çok bozularak kavisli ve iğnemsî bir yapı oluşur. Her iki durumda da özgül yüzey büyüktür. Fışkıran

madde katılaşma sürecinde camsı bir yapı kazanmaya başlar. Fakat, sadece camsı fazdan oluşan Piroklastik kaya yoktur (18).

Bunun sebepleri aşağıda verilmiştir:

- a- Fıskıran parçacıklar az ya da çok miktarda (%1-61) fenokristaller şeklinde kristalize madde içerirler. Piroklastik kayalarda feldspat, kuvars, biotit, magnetit, hornblend ve ojit en fazla bulunan fenokristallerdir.
- b- Volkanik camsı fazın kimyasal kararsızlığından dolayı, mevcut olan mineraller değişime uğrar ve yeni mineraller oluşur. Bu dönüşümün sonucu olarak feldspat ve kristobalit mineralleri meydana gelir. Feldspat ve tridimit önceden oluşan camsı yapının yüzeyindeki gaz fazlarının etkisiyle büyüyebilir. Hava koşullarının kimyasal ve fiziksel değişikliklerin etkisi, zeolitlerin ve kil minerallerinin oluşumuna neden olur. Bu minerallerin en sık görülenleri:
 - ✓ Buhar fazında ve/veya devitrifikasyonla meydana gelen mineraller; feldspat, kristobalit, tridimitdir.
 - ✓ Bozunma ve diajenezle meydana gelen mineraller; (kil ve zeolit) (18).

Volkanik orijinli puzolanlar

Doğal puzolanların büyük bir bölümü, volkanik orijinli malzemelerdir. Volkanik püskürme sırasında silisli ve alüminli malzemelerden oluşan eriyik durumdaki magma, yüzeye alev olarak çıkarak çok çabuk soğuma gösterdiği taktirde, camsı (amorf) yapıya sahip olmaktadır. Püskürme esnasında gazların da bulunması, malzemenin gözenekli yapıya ve çok büyük yüzey alanına sahip olmasına neden olmaktadır. Yüzey alanının büyük olması ve düzensiz yerleşim göstermelerinden ötürü, alüminli silisler, sulu ortamlarda kalsiyum iyonlarıyla kolayca reaksiyona girebilmektedir. Volkanik püskürmenin çok

hızlı yer alması, malzemenin daha amorf yapıya ve daha yüksek puzolanik aktiviteye sahip olmasına yol açmaktadır.

Volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar ve volkanik küller en çok kullanılan volkanik orijinli puzolanlardır (18).

Diyatomit

Diyatomit, su yosunları sınıfından tek hücreli mikroskobik alglerin fosilleşmiş silisli kavkılarından meydana gelmiş bir çökeldir. Diyatomit toprağı veya kizelgur olarak da bilinen bu malzeme, volkanik bölgelere yakın, tatlı ve tuzlu göl veya deniz sularında yaşayan tek hücreli, mikroskobik, silis yapılu çift karapaslı esmer bir yosun çeşidi olan diyatomelerin ölmesi ve silisli kabukların bir araya toplanması sonucunda meydana gelen bir mineral olarak da tanımlanmaktadır. Diyatomit, hem öğütülmeden hem de öğütüldükten sonra puzolanik özellik göstermektedir (18, 19).

Tras

Tras, silisli ve alümino silisli volkanik bir tuf olup yalnız başına bulunduğu zaman hidrolik özellik göstermediği halde çok ince öğütüldüğünde sulu ortamda ve kalsiyum hidroksitle birlikte normal sıcaklıkta kimyasal reaksiyona girerek hidrolik özellik gösteren doğal puzolanik bir maddedir (20).

Pişirilmiş kil ve şeyl

Büyük miktarda silis ve alüminden oluşan kil ve şeyl mineralleri, kristal yapıya sahiptirler. Doğal yapıları itibariyle puzolanik özellik göstermektedirler. Ancak bir-iki saat kadar 700-900 °C civarında sıcaklığa tabi tutulduklarında, bu malzemelerin düzenli kristal yapısı bozulmakta ve yarı amorf veya düzensiz alümino silisli bir yapı elde edilmektedir. Böylece puzolanik malzeme durumuna gelmektedirler.

Geçmiş yıllarda tuğlanın veya kiremitlerin öğütülmesiyle elde edilen ince taneli malzeme puzolanik malzeme olarak yaygın kullanım alanı bulmuştur. Killi malzemelerin pişirilmesiyle elde edilen puzolanlar, ABD'de, Brezilya'da ve Hindistan'da birçok baraj inşaatında kullanılmışlardır. Daha sonraki yıllarda bu tür puzolanlar, yerlerini, daha kolay ve ekonomik olarak bulunabilen uçucu küllere bırakmışlardır (21).

Yapay puzolanlar

Yapay puzolanlar, sanayi üretim atığıdır. Yapılarında doğal puzolanlardaki gibi oksit bileşenler (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO) içermelerinden dolayı puzolan ve üretimdeki reaksiyonlar sonunda oluştukları için de yapay sıfatı verilerek yapay puzolan denilmiştir. Atıktaki silisin aktifliği, puzolanın aktifliğini belirler. Yapay puzolanlar, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı ve piring kabuğu külüdür (22).

Yüksek fırın cürufu

Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen yüksek fırın cürufu, daha hafif olmasından dolayı yüksek fırınlarda ham demirin üzerinde yer alır. Demir filizi gangi, kok ve kireç taşının yanma sonrası atıkları yüksek fırın cürufunu meydana getirirler (23).

Yüksek fırın cürufu, yavaş soğutulduğu taktirde kristal bir yapıya sahip olur. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve beton agregası olarak kullanılabilir. Öte yandan, hızlı soğutma uygulanması sonucunda ise camsı yapıda bir katı eriyik elde edilmesini sağlar. Bu yarı kararlı camsı malzeme, sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörler kullanılarak, ince öğütülerek ve PÇ'nin hidratasyonu ile ortaya çıkan Ca(OH)_2 'yi kullanmak suretiyle hidrolik özelliğe sahip olur (23).

Uçucu kül

Elektrik üreten termik santrallerde toz haline getirilmiş taş kömürünün yakıt olarak kullanılmasından sonra elde edilen bir yan ürün ya da atık maddedir. Termik santral fırınlarında yanan bu kömürden dolayı oluşan kül, fırının bacasından dışarı çıkar. Havaya karışacak olan bu küller, mekanik ya da elektronik toplayıcılar vasıtası ile toplanır ve çevreyi kirletmeleri önlenir. Bu küller “uçucu kül” olarak adlandırılır (24).

Silis dumanı

Silis dumanı, elektrik ark fırınlarında ferrosilikon ve metalik silisyum üretimi sırasında kömürle kuvars indirgenmesi sonucu yan ürün olarak elde edilir (25). Silis dumanı, bazı ülkelerde katkılı çimento üretiminde kullanılmakta olup Portland silis dumanlı çimento türü Avrupa ve Türk standartlarında yer almaktadır. Ayrıca, silis dumanı kimyasal katkı ile birlikte öğütülerek yüksek dayanım ve performanslı çimentolar elde edilebilmektedir (26).

Pirinç kabuğu külü

Çeltik üretimi sonunda elde edilen zirai ürün atığı kabukların yakılmasıyla elde edilen külün hızlı bir şekilde soğutulmasıyla elde edilir (22).

2.2.3. Puzolanik aktivite

Puzolanik aktivite; birtakım maddelerde var olan kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sulu ortamda “reaksiyona girme” ve “sertleşme” kapasitesidir. Gerçek puzolanik aktiviteden söz edebilmek için bu iki ögenin aynı zamanda oluşması gerekmektedir (26).

Yüksek aktiviteye sahip puzolanların aşağıdaki özelliklere sahip olduğu ampirik olarak belirlenmiştir:

- Yüksek SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve alkali miktarı.
- Yüksek camsı faz miktarı,
- Büyük özgül yüzey.

Bir malzemenin puzolanlığının kanıtlanabilmesi için puzolanik aktivite deneyinde olumlu sonuç vermesi gerekmektedir. Bu deneyler doğal ve yapay puzolanlarda mekanik ve kimyasal deneyler şeklindedir. Mekanik deneyler; puzolan-kireç, puzolan-çimento harçları üzerinde yapılan eğilme ve basınç dayanımı deneyleridir. Kimyasal deneyler ise puzolanlı çimentonun su ile yaptığı hidrasyon sonunda çözeltide oluşan Ca(OH)_2 'i saptamaya dayanır. Ayrıca puzolanların reaktivitesi spektrofotometrik ve kalorimetrik yöntemlerle de saptanabilir.

Puzolanik maddeleri değerlendirmenin bir başka kriteri, puzolan içeren çimento pastalarındaki özgül yüzeyin artış hızını ölçmekle gerçekleştirilir. Değişik kalsiyum hidroksit - emme hızlarına, benzer özgül yüzey artış hızları karşılık gelir (26).

İyi bir puzolan genel olarak açık renklidir. Konsolide ve homojen bir yapıya sahip ve orta yoğunlukta ($2.00\text{-}2.30 \text{ g/cm}^3$) dır. TS 25 'de puzolan-kireç reaksiyonu sonunda;

Eğilme Dayanımı 10 kg/cm^2 ,

Basınç Dayanımı 40 kg/cm^2 'den az olmamalıdır.

Kimyasal bileşimi:

Yüksek $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ miktarı	%80 civarında
Yüksek $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ miktarı	%5 civarında
Yüksek çözünmeyen kalıntı	%80 civarında
Kızdırma kaybı	maks.%8 civarında

Düşük miktarda $MgO + Fe_2O_3$ %8'i geçmemeli

Fe_2O_3 maks.%6

Mineralojik bileşimi

Camsı faz miktarı yüksek (%8 ve daha fazla) alkali feldspat (ortoklas, sanidin, albit, oligoklas) miktarı yüksek, kil mineralleri (montmorillonit, kaolinit, halosit) düşük miktarda olmalıdır. Çizelge 2.3 'de TS 25 'e göre traslarda aranması gereken kimyasal özellikler verilmiştir (26).

Çizelge 2.3. TS 25 'e göre trasda aranması gereken özellikler

$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	En az %70
MgO	En çok %5
SO_3	En çok %3
Rutubet	En çok %10

2.2.4. Puzolan katkıların beton özelliklerine etkileri

Puzolanlar beton içinde çimento ağırlığının değişik oranlarında kullanılırlar. Bu oran tarafından %15'den %40'a kadar önerilmektedir (27, 28).

Kaliteli puzolanlar optimum ölçülerde kullanıldıklarında betonda;

- İşlenebilirliği iyileştirirler
- Sülfat etkisine karşı direnci arttırlar (1 kg CaO, 1,07 kg SiO_2 bağlar ($CaSiO_2$))
- Hidratasyon ısını düşürürler.
- Alkali-agrega reaksiyonunun zararlı etkisini azaltırlar.
- Isıl büzülmei azaltırlar
- Maliyeti düşürürler.

Puzolanlar fazla kullanıldıkları zaman zararlı da olabilirler;

- Su ihtiyacını arttırırlar.
- Donma ve çözölmeye karşı direnci düşöürörlörlö.
- Sertleşme ve dayanım kazanma hızını azaltırlar.
- Kuruma büzülmösinö arttırırlar (27, 28).

2.3. Çalışmada Kullanılan Puzolanlar

2.3.1. Zeolit

Yirminci yüzyıl teknolojisinin giderek artan hammadde gereksiniminin en çok yansıdığı alan endüstriyel hammaddeler olmuştur. Bunlar içinde ise yoğun araştırmaların yapıldığı ve en çok zincirleme buluşların birbirini izlediği hammaddelerden biri zeolitlerdir. Zeolitler kristal yapıları ve kimyasal özellikleri nedeni ile günümüz endüstrisinin yeri tutulmaz hammaddeleridir (29).

Tarihçesi

Zeoliti 1756'da İsveç'li mineralog Cronstedt keşfetti ve doğal zeoliti sınıflandırdı. Keşfettiği zeolit ısıtıldığında çok çabuk su kaybeden yapısından dolayı Latince "zeo" ve kaya parçalarının ısıtılmasına da "lithos" denilmesinden dolayı malzemeye Zeolit adını vermiştir (30).

Ancak endüstriyel kullanımı bu kadar önemli olan zeolit minerallerinin, doğada volkanik kayaların boşluklarında, müzelerde saklanabilecek kadar az miktarda bulunduğunun bilinmesi, araştırmacıları yapay zeolit üretme olanaklarını araştırmaya itmiştir. 1948'de Union Carbide Corporation'un başlattığı araştırmalar olumlu sonuçlanmış ve yapay zeolitler üretilmeye başlamıştır. Fakat yapay üretimlerinin pahalı oluşu, büyük miktarlarda üretim yapılabilecek doğal zeolit yataklarının aranmasını hızlandırmıştır.

Birçok kaynakta tortul kayalar içinde de zeolitlerin varlığından söz edildiği görülmüştür. Esosen türlerinin çok ince kristalli zeolitlerden oluşabileceğini ileri sürmüştür. 1933'de Bramlette ve Posnjak A.B.D'nin batısında, camlı tufelerin büyük bir kısmının klinoptillolit (clinoptilolite) olduğundan söz etmişlerdir. Bu ipuçlarını değerlendiren Union Carbide'li yerbilimciler, 1958 yılında ticari olarak üretim yapılabilecek ilk doğal zeolit yataklarını bulmuşlardır. Daha sonra sürdürülen aramalarla yeni yeni birçok yataklar bulunmuş ve bunların hepsinin daha önce yapılmış jeoloji haritalarında "bozunmuş tuf" veya "camlılığını yitirmiş riyolit" olarak tanımlandığı görülmüştür. Bugün bile birçok yerbilimcinin zeolitleri tanımadan geçmesine karşılık kırk ülkede binden fazla tortul zeolit yataklarının varlığından söz edilmektedir (31).

Son yıllarda X-ışınları difraksiyonu (XRD) ile tortul kayaları oluşturan ince kristalli minerallerin tanınması kolaylaştığı için sayısız zeolit yataklarının bulunması olanağı ortaya çıkmıştır (29).

Mineralojik Özellikleri

Günümüzden yaklaşık iki yüzyıl önce keşfedilen zeolit grubu mineraller ilginç özellikleri nedeniyle günümüzde de hala ilgi çekmeye devam etmektedir. Zeolitler, alkali ve toprak alkali elementlerin kristal yapıya sahip sulu alüminyum silikatlarıdır. SiO_4 ve AlO_4 dörtyüzeylerin (tetrahedralarının) üç boyutta sonsuz bağlanmaları ile oluşan temel silikat yapısına sahiptirler. Yapıdaki her oksijen iki dörtyüzeyli tarafından paylaşılır. Böylece $0/(\text{Al} + \text{Si}) = 2$ atomik oranı olmuştur. Üç değerli alüminyum dörtyüzeylilerde yer alması sonucu açığa çıkan eksi yükün Ca, Na, K gibi artı yüklü alkali metal veya toprak alkali iyonları tarafından dengelenmeleri gerekir. Tam dengeli bir yapıda silisyum yerini alüminyum en fazla 1/1 oranında alabilir. Aynı temel silikat yapısına sahip feldispat grubu minerallerde de eksi yük Ca, Na, K katyonları tarafından dengelenir. Yalnız feldispatlarda artı yüklü katyonlar yapı içindeki küçük boşluklarda yer alırlar ve oksijen atomları ile çepeçevre

sarıldıkları için yapı bozulmadan yer değiştiremezler. Aynı durum zeolitlerde çok farklıdır; Dörtüzyeylelilerin oluşturduğu alüminasilikat temel yapısında Na, Ca, K katyonlarının yer aldığı boşluklar daha büyüktür ve tüm boşlukları dolduramadıkları için kolaylıkla yer değiştirebilirler (30).

Zeolitlerin benzer yapıdaki diğer mineral gruplarından ayrılan en önemli özelliklerinden biri de yapı içindeki kanallarda su moleküllerinin bulunmasıdır. Yapıda bu su moleküllerinin yer alabileceği birkaç muhtemel boşluk vardır. Bu boşluklarda Na, Ca, K katyonları su molekülleri ile çevrilirler ve su molekülleri zayıf bağlarla hem artı yüklü katyonlara hem de silikat yapısına bağlıdır. Genellikle kalsiyumlu zeolitler diğerlerinden daha fazla su içerirler şabazit (chabazite), höylendit (heulandite) ve stilbit (stilbite) yapısı içindeki su molekülleri potasyumundan daha çok kalsiyum katyonu ile bağlantılıdır. Zeolitler ısıtıldıklarında, 100–350 °C da su molekülleri yapıda değişiklik yapmadan, birçok minerallerde görüldüğünün tersine, belli sıcaklıklarda kesikli olarak değil de, sürekli şekilde yapıdan ayrılırlar (22).

Zeolitler ana yapı bozulmaksızın dönüşümlü olarak suyu kazanıp kaybedebilirler ve katyon değişimi yapabilirler. Doğal zeolitler türüne göre değişen kanal boşluklarına sahiptirler. Bu kanallar su molekülleri sarılı halde Na^+ , K^+ , Ca^{+2} gibi tek ve iki değerlikli katyonlarla doludur. Doğal zeolitlerin clinoptilolite, mordenit, şabazit gibi farklı kristal şekillerine sahip çok sayıda türleri vardır (32, 33).

Doğal ve yapay zeolitlerinin çoğunun temel kristal yapısı bilinmektedir. Zeolitlerin sınıflandırılması çok yüzeylelilerinin dilimlerine göre yapılmaktadır. Bugün 90 değişik yapıda yapay zeolit üretilmiştir. Bunlardan bazılarının kristal yapıları bilinen doğal zeolitlere benzemektedir. Fakat birçoklarının kristal yapısı henüz çözümlenmemiştir (30).

Zeolitleri oluşum ortamlarına göre (Mumpton, 1973) altı grupta toplamıştır;

1. Kapalı tuzlu sulu göllerde biriken volkanik malzemenin göl suyu ile kimyasal tepkimesi sonucu oluşan zeolit yatakları.
2. Açık tatlı veya az tuzlu göllerde biriken volkanik malzemenin göl suyu ile kimyasal tepkimesi sonucu oluşan zeolit yatakları.
3. Kıyı veya derin denizel ortamlarda biriken volkanik malzemenin deniz suyu ile kimyasal tepkimesi sonucu oluşan zeolit yatakları.
4. Düşük ısı gömülme metamorfizması ile volkanik malzemeden veya kalın tortul dizilim içindeki diğer Al - Si 'li malzemeden oluşan zeolit yatakları.
5. Hidrotermal suların veya sıcak kaynak sularının etkisi ile Al-Si' li malzemenin bozunması sonucu oluşan zeolit yatakları.
6. Gölse veya denizel ortamlarda oluşmuş, fakat köken kayacın volkanik malzemeden olduğunu belirleyici kanıtları izlenemeyen zeolit yatakları (34).

Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Zeolit minerallerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden başlıcaları; iyon değiştirme, adsorpsiyon ve dehidratasyon özellikleri ile silis içeriği olarak sıralanabilir. Her zeolit minerali için farklılıklar gösteren bu özellikler, iskelet yapısı ile kanal veya boşluk sistemlerinin katyonik bileşiminin bir fonksiyonudur. Doğal zeolitlerin tüm ticari uygulamalarında, bu fiziksel ve kimyasal özelliklerin bir veya birkaçından yararlanılmaktadır. Endüstriyel ve tarımsal teknolojide bu özelliklerden en çok kullanılanları katyon değiştirme, adsorpsiyon, dehidratasyon ve buna bağlı ısı kararlılıktır (32).

İyon değiştirme

Zeolitlerde tetraederlerden oluşmuş iskelete zayıf bağlarla bağlanmış olan katyonlar, zeolitin içinde bulunduğu çözeltideki katyonlarla kolaylıkla yer değiştirebilirler. Bu nedenle zeolitler etkin iyon değiştirici olarak bilinirler. Zeolitlerin iyon değiştirme kapasiteleri 3-4 miliekivalen/grama çıkabilir.

İyon değiştirme kapasitesi; iskelet yapısındaki Si yerine gelen Al miktarının bir fonksiyonudur. Diğer bir deyişle, Al miktarı arttıkça, daha fazla yük eksikliği ortaya çıkacak, sonuçta da yapıdaki alkali ve toprak alkali elementlerin miktarı yükselecektir. Bu iyon değiştirme kapasitesi katyon türlerinin cins, boyut, değerlilik ve yapıdaki görevlerine; sıcaklığa; çözeltideki katyon türlerinin konsantrasyonuna ve zeolit minerallerinin cinsine bağlıdır (32).

Adsorplama

Zeolitlerin en önemli özelliklerinden biri bal peteğine benzeyen mikro gözenekli bir yapıya sahip olmalarıdır. Mikro pencerelerle birleşerek bir boşluk ve kanal sistemi oluşturan bu mikro gözenekler, normal oda sıcaklığında su molekülleri ile doludur. Zeolitik su olarak adlandırılan bu su molekülleri zeolitler ısıtıldığında yapıdan uzaklaşır. Bu olay, zeolitlerin büyük bir kısmında kristal yapıda değişikliğe neden olmaz. Genellikle 350-400 C'de ısıtılarak buharlaştırılan suyun kristal yapıda bıraktığı boşluklar, bu boşluklara sığabilecek büyüklükteki gaz ve sıvı molekülleri ile doldurulabilir. Ancak zeolitlerin, homojen bir mikro pencere ve kanal giriş çapına sahip olmaları nedeniyle, bir gaz veya sıvı karışımından sadece bu pencerelerden geçebilecek büyüklükteki moleküller adsorplanır, daha büyük olanlar zeolit yapısının dışında kalır. Bu özelliklerden dolayı zeolitlere "moleküler elek" adı verilir.

Zeolitlerde adsorpsiyon olayı bir yüze tutunmadan çok mikro gözeneklerin doldurulmasıdır. Adsorpsiyon olayını denetleyen mikro gözeneklerin alanı, bir kaç yüz m²/gr mertebesindedir. Zeolitler kuru ağırlıklarının % 30'una kadar gaz veya sıvı molekuln adsorplayabilirler (32).

Dehidratasyon

Zeolitler ısıtıldıklarında, yapılarındaki zeolitik suyu verebilmekte (dehidratasyon) ve soğutulduklarında bu suyu tekrar alabilmektedirler (rehidratasyon).

Zeolitler, 100 °C'nin üzerinde gerçekleşen dehidratasyon sırasındaki davranışlarına göre iki gruba ayrılırlar.

- a) Kristal yapılarında belirgin değişiklik göstermeyen, buna karşın sıcaklığa bağlı olarak devamlı bir ağırlık kaybına sahip olanlar. (Doğal zeolitlerden şabazit, mordenit; erionit ve klinoptilolit'in 700-800 °C'ye kadar kristal yapılarında önemli bir değişiklik gözlenmez. Bu mineraller bu sıcaklıklara kadar zeolitik, yani dehidratasyon-rehidratasyon özelliklerini koruyabilmektedirler).
- b) Kristal yapı değişimi ile birlikte sıcaklığa karşı sürekli ağırlık kaybı gösterenler.

(Natrolit grubu mineraller, 300 °C'nin altında dehidrate edildiklerinde tekrar su moleküllerini adsorbe edebilirler. Daha yüksek sıcaklıklarda yapısal değişiklik nedeniyle bu minerallerin zeolitik karakterleri kaybolur).

Bu nedenlerle, zeolit minerallerinin dehidratasyon özelliklerinden yararlanılan teknolojik uygulamalarda, bu minerallerin ısı kararlılıklarının bilinmesi gerekir (34).

Kullanım Alanları

Doğal ve yapay zeolitlerin endüstride geniş kullanım alanları bulmalarının belli başlı nedenleri, kimyasal ve fiziksel özelliklerinin birçok kullanım alanlarına uygun olmasındandır. Bunlar, yüksek iyon değişim kapasitesi,

yüzeysel soğurma ve moleküler elek olma özelliği, kristal yapısının bozulmadan dehidratasyona uygunluğu, düşük birim ağırlık, silis bileşimine sahip oluşu gibi özellikleridir.

Günümüzde önemli bir endüstriyel hammadde durumunda olan zeolitlerin kullanım alanlarını beş ana başlıkta toplamak mümkündür (32):

a) Kirlilik Kontrolü

- Radyoaktif atık ayırma
- Atık suların temizlenmesi
- Baca gazlarının temizlenmesi
- Petrol sızıntılarının temizlenmesi
- Oksijen üretimi

b) Enerji Sektörü

- Kömürün gazlaştırılması
- Doğal gazların saflaştırılması
- Güneş enerjisinden yararlanma
- Petrol ürünleri üretimi

c) Tarım ve Hayvancılık

- Gübrelerin kötü kokusunu giderme
- Gübrelerin nem içeriğinin kontrolü
- Gübreleme ve toprak hazırlanması
- Tarımsal mücadele, toprak kirliliğinin kontrolü
- Besicilik, su kültürü

d) Madencilik ve Metalürji

- Maden yataklarının aranması
- Metalürji

e) Diğer Uygulama Alanları

- Kağıt endüstrisi

- İnşaat sektörü
- Sağlık sektörü
- Deterjan sektörü

Zeolit Rezervleri

Dünya zeolit rezervlerini belirlenmiş rakamlarla vermek mümkün değildir. Rezervler 1950'lerden sonra belirlenmeye başlanmıştır. 1989 yılında 250.000 ton olan dünya doğal zeolit üretimi 1991 yılında 1.000.000 tona ulaşmıştır. Dünya üretiminin yaklaşık % 60'ı Küba tarafından gerçekleştirilmektedir. Diğer önemli üreticiler Japonya, ABD, G. Afrika, Macaristan, Bulgaristan ve İtalya'dır. Dünyada 1756 yılından bu yana bilinen zeolitlerin ülkemizdeki varlığı 1971 yılında belirlenmiştir. Ülkemizdeki zeolit oluşumları klinoptilolit, heulandit ve analsim minerallerinden oluşmaktadır. Diğer zeolit minerallerine daha az rastlanılmıştır. Çizelge 2.4.'de Türkiye'de belirlenmiş zeolit yatakları ve mineral türleri verilmiştir (32).

Dünyada doğal zeolitlerin kullanımı ve üretimi artarken Türkiye'deki zeolit yataklarının büyüklüğü, kalitesi, işletilebilirliği ve kullanım alanları ile ilgili bilgilerin azlığı zeolit kaynaklarının değerlendirilmesini engellemektedir. Balıkesir Bigadiç yöresindeki sahada 50 milyar ton civarında toplam rezerv tespit edilmiştir. Bigadiç yöresinden boratlı seviyeler üzerindeki zeolitli üst tuf biriminden üretilen zeolit yurtdışına ihraç edilmektedir (34).

Tortul zeolitlerin açık renkli, hafifi, çok ince kristalli ve silikat bileşiminde oluşları zeolit oldukları bilinmeden de tarih boyunca yapı taşı, çimento malzemesi olarak ve tarım alanında kullanılmaları sağlanmıştır (31).

Türkiye her ne kadar özellikle Batı Anadolu Bölgesi'nde zengin zeolit yataklarının sahip ise de zeolit endüstriyel kullanımı henüz tam olarak geliştirilememiştir. Son yıllarda Türkiye'de zeolit kullanımı daha çok atık suların sertliğinin giderilmesi ve zirai amaçlar üzerine yoğunlaşmıştır (32).

Çizelge 2.4. Türkiye'de tespit edilmiş olan zeolit yatakları ve türleri (32)

Zeolit Yatakları	Türleri
Bahçecik, Gölpazarı, Göynük	Analsim
Polatlı, Mülk, Oğlakçı, Ayaş	Analsim
Nallıhan, Çayırhan, Beypazarı, Mihaliççık	Analsim
Kalecik Çandır Şabanözü Hasayaz, Yozgat	Analsim
Balıkesir - Bigadiç	Klinoptilolit
Emet - Yukarı Yoncağağaç, Kütahya	Klinoptilolit
Kütahya - Şaphane	Klinoptilolit
Geniz, Hisarcık, Kütahya	Klinoptilolit
Gördes,Manisa	Klinoptilolit
İzmir-Urla	Klinoptilolit
Kapadokya yöresi (Tuzköy-Karain)	Klinoptilolit, Şabazit Mordenit ve Eriyonit

2.3.2. Uçucu kül

Termik santral atıkları

Özellikle endüstriyel yakıt olarak kullanıma olanağı olmayan düşük kalorili kömür yatakları yakınına büyük kapasiteli termik santraller kurulması enerji üretimini artırmak maksadıyla yürütülen çalışmalar arasında başta gelenlerden birisidir. Ancak enerji üretiminin arttırılmasında tutarlı bir çözüm olarak gözüken kömüre dayalı termik santrallerin artması önemli ekolojik, ekonomik ve teknik sorunları da beraberinde getirebilecek olan kül üretiminin de artmasına neden olmaktadır (35).

Termik santrallerde kullanılan taş kömürlerinin % 10-15'i, linyit kömürlerinin ise % 20-40'ı küldür. Termik Santralin 1 kWh'lik enerji üretimi yaklaşık 110 g külün atık madde olarak ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, 1000 MW'lık bir santralden bir yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Bu mertebede bir kül üretiminin depolanabilmesi için

yılda 60.000 m², santralin hizmet süresi olarak kabul edilen 30 yıllık süre için de ise 1.800.000 m² civarında bir araziye ihtiyaç doğmaktadır (35).

Uçucu Kül

Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık %75 - %80'i, gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli küllerdir. Bu küllere "uçucu kül (UK)" denilmektedir.

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

UK'lerde çok yüksek miktarlarda yer alan oksitler SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃'dür. Bunların yanı sıra, bir miktar CaO, MgO, C (çok ince taneli durumda olan yanmamış kömür) ve Na₂O'da bulunabilmektedir.

UK'lerin yapısının büyük bir bölümü (%60 - %90'ı) amorf durumdadır. Geri kalan bölümünde, mullit, kuvars, magnetit, hematit gibi kristaller yer alabilmektedir (36, 37).

UK taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık %5'i (hacminin %20'si) içi boş (nitrojen veya karbon dioksitle dolu) parçacıklardan oluşmaktadır.

UK taneciklerinin boyutları 1-150 um arasında değişiklik göstermektedir. Normal olarak, 2.1 - 2.7 (ortalama 2.4) g/cm³ yoğunluğa sahiptirler. Renkleri açık griden koyu griye uzanan değişikliktedir. Daha çok miktarda karbon içeren küller koyu gri renkte, daha çok demir içerenler ise açık gri renktedir (37).

Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları, ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için, uçucu küller de, aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermektedirler; kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır. O nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilmektedirler. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15 - %50'si civarında değişebilmektedir (37).

Uçucu Kül Sınıfları

Birçok ülke standardında uçucu küllerin sınıflandırılması yer almamakla birlikte, ASTM C 618 no.lu standard, uçucu küllerini F ve C sınıfı olarak iki grupta değerlendirmektedir. Bu sınıflandırma, Çizelge 2.5.'te tanımlanmaktadır.

Ayrıca, %10'dan daha az CaO içeren uçucu küller, "düşük kireçli uçucu küller", %10'dan daha çok CaO içerenler ise, "yüksek kireçli uçucu küller" olarak adlandırılmaktadır (38).

Çizelge 2.5. ASTM' ye göre uçucu kül sınıfları (38)

Sınıf	Tanım
F	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%70$; antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilmekte; puzolanik özeliğe sahip.
C	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%50$; linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilmekte; puzolanik özeliğin yanısıra kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özeliğe sahip.

Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları

Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları, yakıt olarak kullanılan kömürün tipine ve yanma işlemine göre değişiklik göstermektedir.

Çizelge 2.6'da değişik termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin içerikleri gösterilmektedir (36, 37). Buradan görülebileceği gibi, birçok uçucu küldeki " $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ " miktarı %85'in üzerindedir. Uçucu küllerin yeterli puzolanik özellik gösterebilmeleri için bu oksitlerin toplam miktarının F tipi ve C tipi küllerde, sırasıyla, %70 ve %50'den az olmaması gerekmektedir (39).

F tipi uçucu küllerdeki CaO oranı %10'dan daha düşüktür. Bu tür küller sadece puzolanik özellik gösterebilmektedir.

C tipi uçucu küllerdeki CaO oranı, genellikle %10'dan daha fazladır. Yüksek miktarda CaO içeren küller, kendiliklerinden bir miktar bağlayıcılığa sahiptirler.

Çizelge 2.6. Değişik termik santral uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları(36)

Kimyasal İçerik	F Sınıfı Kül (CaO<%10)	C Sınıfı Kül (CaO > %10)
SiO_2	43,6 – 64,4	23,1 – 50,5
Al_2O_3	19,6 – 30,1	13,3 –21,3
Fe_2O_3	3,8 – 23,9	3,7 – 22,5
CaO	0,7 – 6,7	11.5 – 29,0
MgO	0,9 –1,7	1,5 –7,5
Na_2O	0 –2,8	0,4–1,9
C (kızdırma kaybı)	0,4 –7,2	0,3 –1,9

Kullanım Alanları

Türkiye'de toplam uçucu kül üretimi yaklaşık 13 milyon ton/yıl'dır. Bu ölçüde büyük boyutlara varan uçucu kül üretimi kullanım alanlarında değerlendirilerek atık madde niteliğinden kurtarılmadıkça potansiyel bir problem olmaya devam edecektir (35).

Enerji ihtiyacındaki artışa paralel olarak üretim miktarı büyük ölçülere ulaşan uçucu küllerin tarımdan kimyaya, zemin ıslahından çeşitli yapı malzemeleri üretimine kadar çok sayıda potansiyel kullanım alanları mevcuttur (40). UK'nin en çok kullanılabileceği alanların başında inşaat sektörü gelmektedir. Bu alanda yapılan çalışmaların çoğunluğu uçucu küllerin çimento, beton, tuğla, hafif agrega üretiminde, zemin stabilizasyonu ve dolgu yapımında kullanılmasına yöneliktir (35).

UK'li çimento üretimiyle sağlanacak yararlar (i) üreticinin yararları, (ii) kullanıcının yararları ve (iii) çevresel yararlar olarak üç ana kategoride toplanır. Çimento sektöründe teknolojik gelişmelerin hemen hemen tamamı enerjinin etkin kullanımına yönelik olmuştur. Ön ısıtıcılı, ön kalsinasyonlu sistemlerin geliştirilmesinin yanı sıra, en önemli gelişmeler öğütme sistemlerinde olmuştur (40).

Bilindiği gibi, çimento üretiminde kullanılan toplam elektrik enerjisinin % 40'ından fazlası öğütme işlemlerinde harcanmaktadır. Bu nedenle, yeni öğütücüler, separatörler, değirmenler tasarlanmış ve kullanılmaya başlanmıştır. Öte yandan, tüm dünyada çimentoda daha fazla mineral katkı kullanılması yönünde artan bir eğilim bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, uçucu küllerin çimentoda kullanılması üreticiler açısından (40);

- Klinkerizasyon enerjisinde tasarruf,
- Öğütme enerjisinde tasarruf,
- Kurutma enerjisinde tasarruf,

- Çevre dostu çabalarının ve faaliyetlerinin bir diğer göstergesi olması,
- Ürün çeşitliliği sağlaması,
- Elde edilecek çimentonun muhtemelen üstün özellikleri bakımından yararlı olacaktır.
- Maliyet açısından bakıldığında, kullanılacak uçucu kül miktarı ve tipine göre değişecek olmakla birlikte,

sabit bir mamul madde (çimento) miktarı için daha az klinker üretimi tras ve cüruf gibi mineral katkılara kıyasla, zaten ince olan tane boyutları nedeniyle, daha az öğütme enerjisi gereksinmesi yine tras ve cüruf gibi katkılarda gerekebilecek ön kurutmaya ihtiyaç göstermemesi yukarıda belirtilmiş olan uçucu küllü çimento üretimiyle sağlanacak küllerin taşıma mesafeleri bakımından da ele alınması gerektiği unutulmamalıdır. Bu açıdan bakıldığında, uygun termik santrallerin yakınına öğütme-paketleme tesisi kurulması ihtimali de ekonomik yararları bakımından değerlendirilebilecek bir husustur (40).

Ülkemizde kömürle çalışan santrallerin atık ürünü olan uçucu küllerin karakterizasyonu, sınıflandırılması ve bu küllerin çimento üretiminde ve çimentolu sistemlerde kullanılabilirliklerinin belirlenmesi amacıyla TÇMB tarafından bir çalışma yapılmış ve birinci aşamada Türkiye'de tüm kömürle çalışan santrallerden temin edilen uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyonları, sınıflandırılmaları, ulusal ve uluslararası standartlara uygunlukları belirlenmiştir (35).

2.3.3. Cam

Tanımı

Doğal hammaddelerin karışımlarının ergitilmesi ile elde edilen camın, en önemli hammaddesi yer kabuğunun % 60'ını oluşturan silikadır (SiO_2). Diğer önemli hammaddeler; tuz yataklarının buharlaşması ile oluşan sodyum

karbonat, soda (Na_2CO_3) ve deniz organizmalarının kalıntılarının fosilleşmesi ile oluşmuş kireçtaşı (CaCO_3). Kuma soda ilavesi, normal olarak 1723°C 'de ergiyen silikanın 900°C 'de bile eritilmesini sağlar. Kireçtaşı ise, camın sertliğini ve kimyasal dayanımını artırır (41).

Hammaddeleri

Cam üretiminde kullanılan ana maddeleri, cama kazandırdıkları özellikler bakımından, camlaştırıcı, eritici, camlık özelliğini sabitleştirici, arıttıcı ve renklendirici olmak üzere 4 ana grupta toplanabilir (42)

- Camlaştırıcı maddeler:

Normal camlarda kullanılan SiO_2 veya camın kimyasal etkilerine dayanımını artırıp ışığı kırma özelliği kazandırarak kristal veya özel camlarda kullanılan bor oksidi B_2O_3 .

- Eritici maddeler:

Güç erime özelliğine sahip SiO_2 'i kolay eritmek amacıyla adi camlarda kullanılan sodyum oksit -ilk maddesi soda- (Na_2O) ve berraklık verdiği için kristal camların bünyesinde yer alan potasyum oksit (K_2O).

- Sabitleştirici maddeler:

Camlık halini tespit etmek ve cama birtakım özellikler kazandırmak için kullanılan bu maddelerden normal camda kireç (CaO), şekillendirilecek camlarda mekanik işlemleri kolaylaştırılan magnezyum oksit (MgO), kristal camlarda camın yoğunluğunu ve ışığı kırma kabiliyetini artırdığından baryum oksit (BaO) ve kurşunlu oksitler (PbO , Pb_3O_4), basınca ve ısıya dayanıklı camlarda alüminyum oksit (Al_2O_3).

- Artırıcı ve renklendirici maddeler:

Erimiş halde bulunan camın bünyesine giren hava ve gaz kabarcıklarını gidermek için arsenik asit (As_2O_4), Potasyum nitrat (KNO_3), sodyum sülfat (Na_2SO_4) ile cama renk vererek şeffaflığını gidermek için katılan kalay oksit (SnO), opal cam için florin (CaF_2) ve sodyum alüminofuat (Na_3AlF_6) gibi maddeler, özellikle güneş kontrolünde kullanılan camlara çeşitli renkler kazandıran (Cr_2O_3 – Yeşil, CuO , CoO – mavi, NiO – mor, SeO – kırmızı, AgO – sarı vs.) metal oksitlerdir (42).

Çizelge 2.7. Çeşitli camların Bileşimine Giren Ana Madde Oranları (%) (43)

Cam çeşidi	SiO_2	CaO	Na_2O	K_2O	Al_2O_3	PbO	B_2O_3
Pencere camı	70-72	10-12	12-14	-	0,5-1	-	-
Dökme kalın cam	70-72	13-15	10-15	-	0,5	-	-
Kristal	54	-	-	12	-	34	-
Ateşe dayanıklı cam	80	-	4	-	2	-	12
Optik cam	30-60	-	-	15	-	20-70	-

Özellikleri

Camlar amorf iç yapılı, özellikle mekanik, yanal etkilere, atmosfer etkilerine ve ısı değişikliklerine yüksek dayanımlı, ışığı düzgün kırma özelliğine sahip, güneş radyasyonuna geçirimli saydam yapı malzemeleridir (43).

Saydamlık, geçen ışığın, gelen ışığa oranı olup, camlarda $K=\%80-98$ 'dir. Bu nedenle cam, henüz en saydam plastikten daha yüksek bir saydamlığa sahiptir.

Camın diğer özelliklerini belirleyen değerler (43):

1. Isı genleşme katsayısı: $0,9 \times 10^{-6} \text{ cm/cm}^0\text{C}$
2. Isı geçirimsilik katsayısı: $0,81 \text{ W/m.K}$
3. Isı geçirimsilik değeri: $9,6 \text{ W/m}^2.\text{K}$
4. Saydamlık: 0,76
5. Camın ses tutuculuk değeri: 30 dB
6. Mekanik özellikler:
 - Basınç dayanımı: $525\text{-}900 \text{ N/mm}^2$
 - Çekme dayanımı: $30\text{-}90 \text{ N/mm}^2$
 - Sertlik : 5-7 Mohs

Camın sertliği

Sertlik; bir malzemenin aşınmaya ve delinmeye karşı direncini ifade eder; malzemenin bir temel fiziksel özelliği olmayıp, çeşitli fiziksel özelliklerin karmaşık bir kombinasyonunun sonucudur. Camın gerçek sertliği, mekanik özelliklerine, özellikle Poisson oranına ve çekme dayanımına bağlıdır. Basınç altında camın yoğunluğunun arttığı bilinmektedir ve sertlik ölçümünde cam yüzeyinde oluşan iz, elastik deformasyon, plastik akma ve baskı ucu altında yapının sıkışmasının ortak bir sonucu olabilir (43).

Atık cam

Geri kazanım

Cam, kum (kuartz), soda, kireç, feldispat ve iz elementler gibi hammaddelerin yüksek sıcaklıkta eritilmesiyle üretilir. Bu hammaddelerin çıkarılması doğal kaynakların tüketimine ve üretim esnasında kullanılan enerji, su ve oluşturulan kirlilik çevreye zarar vermektedir. Doğal kaynakların tükendiği ve

evre kirliliğinin önemli boyutlara ulaştığı günümüzde, tüm atıkların geri kazanımında olduğu gibi cam geri kazanımı da önemli ve yaygındır. Camların toplanarak geri kazanımıyla sağlanan tasarruflar (44);

Enerji tüketiminde azalma	: %25
Hava kirliliğinde azalma	: %20
Maden atığında azalma	: %80
Su tüketiminde azalma	: %50

Korunan doğal kaynaklar: Kum, soda, kireç geri kazanılması depolama sahalarının ömrünü uzatır, doğal kaynakları korur ve atık bertaraf maliyetlerini azaltır (44).

Ülkemizde öp içindeki geri kazanılabilir madde oranı yaklaşık olarak %12'dir. Cam şişelerin Türkiye genelindeki geri kazanım oranı %36'dır ve cam geri kazanım çalışmaları Şişe Cam Grubu bayileri kanalıyla toplanmakta ve 6570 bin ton atık cam tekrar işlenerek geri kazanılmaktadır. Bursa'da ise çöp içindeki geri kazanılabilir madde oranı %10 ve geri kazanılan materyal kompozisyonu içindeki cam oranı %43'tür (44).

Cam işleyen fabrikalar normal pencere camı, buzlu cam, ısıcam ve oto cam imalatı yapmaktadırlar. Camın işlenmesi sırasında katı atık olarak cam kırığı, cam parçaları meydana gelmektedir. Camın üretimi esnasında da bir takım çevresel etkileri vardır. Bir ton işlenmemiş cam için yaklaşık 1,2 ton hammaddeye ihtiyaç vardır. Bunların içerisinde en büyük payı kuvars kumu ve soda almaktadır. Kuvars kumu elde edilirken doğadaki peyzaj bozulmakta, yoğun bir ses, gürültü ve toz kirlenmesi meydana gelmektedir. Yine, her ton soda üretimi sırasında 950 kg tuz açığa çıkmakta ve sorun yaratmaktadır. Cam üretimi sırasında yoğun bir enerji harcanmakta ve eritme aşamasında hava kirlenmesi meydana gelmektedir. Cam diğer ambalaj maddeleri içinde, geri kazanmaya ve çok kere kullanmaya en elverişli olan maddedir (45).

20. yüzyılın sonuna doğru çevrecilik kavramının, sürdürülebilir kalkınma ilkesi çerçevesinde ele alınması doğal çevrenin, ekonomik ve sosyal boyutuyla birlikte toplumların üçüncü sacayağını oluşturduğu gerçeğinin anlaşılacak, bunun temel sosyal yaklaşım olarak benimsenmesine yol açmıştır. Buna bağlı olarak da, günümüzde geri dönüşüm faaliyetleri ülkelerin sosyal ve ekonomik gelişmişlik düzeyini gösterir makro düzey parametreleri haline gelmiştir(46).

Öte yandan, Türkiye’de de belediyelerce toplanmakta olan atıkların yaklaşık yedide birini oluşturan ambalaj atıkları, “düzenli atık depolama alanları” için önemli bir maliyet kalemidir. Çöp dağlarının tehdidi altındaki hava, su ve taş küreler, orman ve tarım arazileri ile deniz, göl ve akarsu ekosistemleri; her ne kadar teorik olarak yenilenebilir doğal kaynak olarak sayılsalar da, kaynağın kendini yenileme kapasitesinin üstündeki aşırı kullanımlarla oluşan yoğun kirlilik sonucu kendini yenileyemediğinden yok olmaktadır (46).

1970’lerden bu yana bir milyon tonun üzerinde cam ambalaj atığı toplanarak; yenilenemeyen doğal kaynaklardan 1,5 milyon ton hammadde ve 30 bin tonun üzerinde de fosil yakıt tasarrufu ve dolayısıyla sera gazı emisyonunda önemli azalma sağlanmıştır. KAKY kapsamında 2003 yılında ülke ekonomisine kazandırılan 120 bin ton ambalaj atığının 80.000 tonu camdır. 2003 yılı sonuna kadar geçen sürede kumbaralarla geri kazanılan CAA miktarı 65.000 tonun üzerindedir. Ayrıca, belediyeler ile yapılan protokoller çerçevesinde, toplanan cam ambalaj atığı miktarına bağlı olarak hayır ve yardım kurumlarına bugünkü değerlerle 150 milyar TL’yi aşan bağışta bulunulmuştur(46).

Cam kırığı yeni cam ambalaj üretiminin yanı sıra, cam mozaik ve cam kürecik imalatında girdi olarak kullanılır. Ayrıca büyük miktarlarda olmamakla birlikte cam kırığı uygun şekilde işlenerek sınaî yüzey temizleyicisi cam kumu, filtre ajanı cam tozu, katkı ve dolgu malzemesi şeklinde birçok alanda kullanılır. Cam mozaik, bina dış cephelerinde izolasyon, iç mekanlarda ise dekorasyon

amaçlı olarak kullanılır. Cam kürecik ise katma değeri yüksek ve oldukça da teknolojik bir üründür. Trafik ve yol işaretleri ile yol çizgi, şerit ve kaplamalarında kullanılan boyalara katılarak işaretlerin ışığı geri yansıtması ve gece ışıldaması sağlanır (46).

Cam asfaltın yaygın olarak kullanıldığı Tayvan'da, 5 milyon ton atığın içinde cam atığın oranı yüzde 20 ve bu atıkların maliyeti sebebiyle geri dönüştürülemeyen kısmı yol yapımında kullanılıyor. Türkiye'de geri dönüşüme kullanılmayan 1 yıllık cam atık stokunun, sadece İstanbul'daki cam asfalt yapımında 1 yılda eritilebileceği tahmin ediliyor (46).

Camların geri kazanım için ayrılması

Son yıllarda eski camların cam üretiminde kullanılması artmaktadır. Eritmeden önce, cam parçalarının işlenmesi gerekir, yani metal, seramik, kağıt, plastik ve diğer zarar veren maddelerin ayrılması gerekir. Bunun için iki ayırma metodu kullanılabilir (44):

1. Mekanik ayırma
2. Lazer ışığıyla ayırma

1. Mekanik ayırma:

Cam atıkların diğer evsel atıklardan ayrılması için bazı mekanik metotlar geliştirilmiştir. En çok kullanılan iki metot: Yüzdürme batırma (floatsink method) ve köpük flotasyonu (froth flotation method)

Yüzdürme batırma (floatsink) metodu: İçinde orta yoğunlukta bir sıvı bulunan tankta, hafif materyallerin üstte kalması ve ağır olanların ise batması esasına dayanır. Bu proses, farklı yoğunlukta sıvıların kullanımı ile adımlar halinde tamamlanır. Sonuçta, cam diğer atıklardan tamamen ayrıldığında geri kazanım prosesleri için hazır durumdadır.

Köpük flotasyonu (froth flotation) metodu: Köpük flotasyonu, yüzdürmebatırma metoduna göre daha verimlidir. %95 ten daha fazla cam saflığı sağlar. Maliyet olarak daha fazladır. Bu metot, cam yüzeyine yapışan bir orta organik maddenin kullanımı ile katıları yüzey özelliklerine göre ayırma esasına dayanır. Bu metotlar iyi bir atık ayrımı sağlar. Fakat günümüzde cam geri kazanımında karşılaşılan en büyük problem, cam atıkların renklerine göre ayrılmasıdır. Bunun için lazer ışığı kullanılan ayırma metotları kullanılmaktadır (44).

2. Lazer ışığıyla ayırma:

Hazırlama tesislerinde kullanılmış cam ürünler, tek renk ve diğer yabancı maddelerden ayrılmış cam granülü haline gelir.

- Öncelikli olarak yabancı maddeler elle ayrılır.
- Camlar 5 ile 60 milimetre büyüklüğündeki parçalara kırılır.
- Daha sonra teneke kapaklar magnetik seperatörle ve alüminyum kapaklarsa girdaplı seperatörle ayrılır (44).

2.4. Puzolanlar İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Mon (47), çimento üretimi sırasında çimento değirmenine uçucu kül katılmasının, çimentonun özelliklerini değiştirdiğini ifade etmiştir. Bu çalışmada, uçucu külün çimentoya öğütülmüş halde katılması veya değirmende, klinker, alçıtaşı ile birlikte öğütülme şeklinin çimentonun ve harcın özelliklerine etkisi incelenmek istenmiştir. Çalışmada, uçucu külün çimento ile birlikte öğütülmesinin uçucu külün puzolanik, karakteri ile ilgili olduğu ve birlikte öğütülen çimentonun daha fazla dayanım kazandığını tespit etmiştir.

Gökçe, Uyan ve Öztekin (48), üç ayrı uçucu kül kullanarak, 300 dozlu betonda çimento yerine % 20 ve % 30 uçucu kül katılarak toplam on seri

beton üretilmiştir. Uçucu kül tanesi irileştikçe ve katkı oranı arttıkça, betonun sabit işlenebilme için gereksindiği su miktarının arttığı saptanmıştır.

Akman (49), inceliği yüksek olan Puzolanların kimyasallara karşı koruyuculuklarının da fazla olduğu, Puzolanların nitratlar karşısındaki bozulmaları, sülfat bozulmalarından fazla olduğu ifade edilmiştir.

Yılmaz ve arkadaşları (50), doğal zeolitin % 10, % 20, % 30 katkılı olarak, doğal zeolit katkılı (ZKÇ) ve doğal zeolit + taban külü katkılı (ZTKKÇ) çimentoların fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Zeolit miktarının % 30'a çıkarıldığında, öğütme süresinin % 30 azaldığını saptamışlardır.

Okucu (51), iki farklı zeolitik tüfü, endüstriyel kullanıma yakınlık açısından % 24, % 26, %28 katkı oranlarında çimentoda kullanmıştır. Zeolitik tüf katkılı çimentoların ilk günlük mukavemetlerinin düşük olduğunu, 28 günlük mukavemetlerinin oldukça yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Wiens ve diğ. (52), PÇ, UK, silis dumanı ve/veya yüksek fırın cürufu içen iki ve üç bileşenli çimentolarla yapılmış betonlarda çelik donatı korozyonunu incelemişlerdir. PÇ yerine büyük oranlarda puzolanik madde katılması ile gözenek sıvısındaki pH değerinin önemli ölçüde düştüğünü saptamışlardır.

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Deney çalışmalarında kullanılan zeolit, Manisa ili Gördes ilçesinden temin edilmiştir. Uçucu kül, Muğla ili Kemerköy Termik santralinden ve cam malzeme, atık pencere camları toplanarak elde edilmiştir. Kontrol numunesi olarak kullanılan PÇ 42,5 çimentoları ile deney çimentolarının üretilmesinde kullanılan klinker ve harç karışımlarında kullanılan standart kum, Set Ankara Çimento Fabrikasından sağlanmıştır.

3.1.1. Çimentolar

Kontrol çimentosu olarak PÇ 42,5 (CEM I) tip çimento kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan çimentoların kimyasal analizleri, TS EN 196-2 "Çimento Deney Metotları - Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi" (53) standardına göre, fiziksel-özellikleri ise TS EN 196-1 "Çimento Deney Metotları -Bölüm 1: Dayanım tayini" (54), TS EN 196-3 "Çimento Deney Metotları - Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini" (55), TS EN 196-6 "Çimento Deney Metotları -Bölüm 6: İncelik tayini" (56) standartlarına göre yapılmış ve PÇ 42,5 ile klinkerin kimyasal analizleri ve fiziksel özellikleri, Çizelge 3.1'de verilmiştir.

3.1.2. Klinker

Katkılı çimento üretiminde, Portland çimentosu klinkeri kullanılmıştır. Klinkerin kimyasal analizi, TS EN 196-2' ye göre, fiziksel özellikleri ise TS EN 196-1, TS EN 196-3, TS EN 196-6 ve TS EN 196' ya göre yapılmıştır. Klinkere ait kimyasal analiz ile fiziksel deney sonuçları, Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. PÇ 42.5 çimentosu ve klinkerin kimyasal analizleri ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Analiz	PÇ 42,5	Klinker
CaO	62,72	64,52
SiO ₂	20,00	21,25
Al ₂ O ₃	4,92	5,54
Fe ₂ O ₃	3,76	3,58
MgO	1,84	1,94
SO ₃	2,65	0,83
K ₂ O	0,73	0,76
Na ₂ O	0,26	0,71
Kızdırma Kaybı	2,54	0,30
Çözünmeyen Kalıntı	0,00	-
Fiziksel Özellikler		
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,08	3,15
Özgül Yüzey (blaine) (cm ² /g)	3250	3510
200 µm elek üstü kalan (%)	0,0	0,0
90 µm elek üstü kalan (%)	0,2	0,7
40 µm elek üstü kalan (%)	6,5	7,1
Priz Başlangıcı (saat:dk.)	2:35	1:40
Priz Sonu (saat:dk.)	3:50	2:50
Hacim Genleşmesi	2	2

3.1.3. Puzolanlar

Çimento ve harçların üretilmesinde Manisa Gördes'ten elde edilen 0,15 – 2 mm tane boyutlarındaki kırılmış ve elenmiş zeolitleri, Muğla Kemerköy Termik santralinden alınan uçucu kül ile atık pencere camları kullanılmıştır. Atık camlar, Los Angeles aşınma aletinde 30 dak. süre ile boyutları 1-3 cm

arasında olana kadar aşınmaya tabi tutulmuştur. Puzolanlara ait kimyasal analiz TS 687`ye göre yapılmış, sonuçları Çizelge 3.2` de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Puzolanların kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal özellikler,%	Zeolit %	Uçucu Kül %	Cam %
SiO ₂	63,84	13,48	68,95
Al ₂ O ₃	10,81	4,37	0,53
K ₂ O	3,60	0,52	0,24
Na ₂ O	0,05	1,26	13,20
Fe ₂ O ₃	1,43	1,76	0,16
CaO	1,77	52,30	7,99
MgO	2,25	4,87	6,02
SO ₃	0,06	13,67	0,22
Fiziksel Özellikler			
Özgöl Ağırlık, gr/cm ³	2,23	2,73	2,51

3.1.4. Standart kum ve su

Harç numunelerinin hazırlanmasında; Trakya Set Çimento Sanayii T.A.Ş. Çimento Fabrikası üretimi olan TS EN 196-1 (54) Rilem-Cembureau Pınarhisar Standart kumu Çimento ve harç karışımlarında çimentoya zararlı olabilecek organik madde ve madensel tuzları ihtiva etmeyen Ankara şehir içme suyu kullanılmıştır.

3.2. Metot

Puzolanların kimyasal analizi ve çimentolar ile ilgili deneyler Set Ankara Çimento Fabrikasında, harç deneyleri Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü beton laboratuarlarında yapılmıştır.

3.2.1. Puzolanik aktivite deneyi

Puzolanlar, puzolanik aktivite deneyinde kullanılmadan önce Memmert marka etüvde 105 ± 2 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Puzolanlar Linatex marka bilyalı değirmende yaklaşık 1 saat 30 dakika süre ile öğütülmüştür. Puzolanların özgül ağırlıkları, Le Chatelier balonu kullanılarak bulunmuştur.

Puzolanik aktivite deneyi için harç numuneleri TS EN 196-1'e göre hazırlanmış ve 16x16x4 cm boyutlarında harç kalıpları kullanılmıştır. Üç adet deney numunesi hazırlamak için gerekli malzeme karışım miktarları TS 25'e göre Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Puzolanik aktivite deneyi için gerekli malzeme miktarları

Malzeme cinsi	Alınacak miktar, g
Sönmüş kireç, $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$	150
Puzolan	$2 \times 150 \times (\text{Puzolan özgül ağırlığı}) / (\text{sönmüş kireç özgül ağırlığı}) = T$
Standart kum	1350
Su	$0,5 \times (150 + T)$

Çizelge 3.3'te verilen, kullanılacak karışım değerlerine göre kullanılan malzeme miktarları belirlenmiş ve Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Puzolanik aktivite deneyinde kullanılan malzeme miktarları

Puzolan cinsi	Sönmüş kireç	Puzolan	Standart kum	Su
Uçucu kül	150	315	1350	232,5
Zeolit	150	257,3	1350	203,7
Cam	150	289,6	1350	219,8

Hazırlanan harç kalıplarının üzen bir cam levha ile kapatılmış ve kenarları buharlaşmayı önleyecek şekilde çekomastik ile yapıştırılmıştır. Numuneler

laboratuvar ortamında 24 saat 55 ± 2 °C'lik bir etüv içinde 6 gün süre ile bekletilmiştir. Numuneler 7. gün kırılmadan 4 saat önce etüvden çıkarılmış ve laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Numunelere TS EN 196-1'e göre eğilme ve basınç deneyleri uygulanmış ve deney sonuçları Çizelge 3.5'de verilmiştir. Görüldüğü gibi Puzolanların yüksek puzolanik aktiviteye sahip olduğunu söyleyebiliriz.

Çizelge 3.5. Puzolanik aktivite deney sonuçları (7 günlük)

Puzolan cinsi	Mekanik özellikler (kgf/cm ²)	
	Eğilme dayanımı	Basınç dayanımı
Uçucu kül	54	141
Zeolit	140	460
Cam	50	105
TS 25 sınırları	≥ 10	≥ 40

3.2.2. Çimento karışımlarının hazırlanması ve üretilmesi

Bu çalışmada zeolit, uçucu kül ve atık camın birbirleriyle %5 ve %10 oranlarında karıştırılmasından yararlanılarak katkıli çimentolar hazırlanmıştır. Puzolanlar, deneyde kullanılmadan önce Membert marka etüvde 105 ± 2 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Beton laboratuvarının deney süresince sıcaklığı, 20 ± 1 °C ve nispi nemi % 40 –60 arasında tespit edilmiştir. Katkıli çimento üretiminde, portland çimentosu klinkeri kullanılmıştır.

Puzolanlar, %5 ve %10 olmak üzere üçlü bileşimlerde ve çimentonun ağırlıkça % 5'i olarak alçı taşı katılarak bilyalı değirmende öğütülmüştür. Katkıli çimentoların (CUKÇ, CZKÇ, ZUKÇ) üretilmesi PÇ klinkerine, Manisa (Gördes) zeoliti, Muğla Kemerköy Termik santrali uçucu külü ve atık cam, çimento ağırlığının %5, %10, oranlarında katılarak %5 alçı taşı ile birlikte öğütülmüştür. Üretilen çimentoların mekanik deneyleri G.Ü. Teknik Eğitim

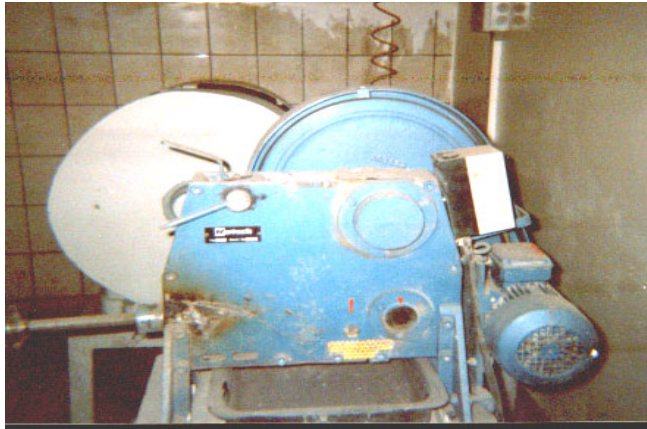
Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü beton laboratuvarında yapılmıştır. Üretilen çimentoların karışım oranları ve kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Katkılı çimentoların karışım oranları ve kullanılan malzeme miktarları

Numune adı	Karışım oranları	Klinker (g)	Katkı (g)	Alçıtaşı (g)	Toplam
CUKKÇ5	% 85 K+% 5 C+% 5 UK % 5 A	2975	350	175	3500
CUKKÇ 10	% 75 K+% 10 C+% 10 UK+% 5 A	2625	700	175	3500
ZUKKÇ 5	% 85 K+% 5 Z+% 5 UK % 5 A	2975	350	175	3500
ZUKKÇ 10	% 75 K+% 10 Z+% 10 UK+% 5 A	2625	700	175	3500
ZCKÇ 5	% 85 K+% 5 Z+% 5 C % 5 A	2975	350	175	3500
ZCKÇ 10	% 75 K+% 10 Z+% 10 C+% 5 A	2625	700	175	3500

K = Klinker, Z = Zeolit, UK = Uçucu Kül, C = Atık cam, A = Alçıtaşı

Karışımda kullanılacak klinker, alçıtaşı ve cam önce Resim 3.1'de görülen Retsch marka uzun çeneli kırıcıdan geçirilmiştir. Daha sonra diğer katkıları da ilave edilip, bilyalı değirmene alınmıştır. Çimentoların üretilmesinde, öğütme süresi sabit tutulmuştur. Katkılı çimentolar, Linatex marka bilyalı değirmende 1 saat 30 dakika süreyle öğütülmüştür. Üretilen numuneler ortamın neminden etkilenmemesi için çift naylon torbaya konulmuş, ayrıca deney süresince herhangi bir yanlışlığa yer vermemek için üzerleri etiketlenmiştir.



Resim 3.1. Retsch marka uzun çeneli kırıcı

3.2.3. Çimentoların kimyasal analizleri

Üretilen çimentoların kimyasal analizleri, TS EN 196-2 "Çimento Deney Metotları Bölüm2: Çimentonun kimyasal analizi" standardına göre yapılmıştır. Çimentolara ait kimyasal analiz sonuçları, Çizelge 4.1'de verilmiştir.

3.2.4. Çimentoların fiziksel deneyleri

Normal kıvam deneyi

Standart kıvam tayini deneyi, TS EN 196-3 "Çimento Deney Metotları - Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayıni" (55) standardına göre yapılmıştır. Deneyde, vicat sondası ve halkası, Toni Teknik marka karıştırıcı ve 0,1 g duyarlıkta Sartorius Basic marka elektronik terazi kullanılmıştır. Üretilen çimento numunesinden, 450 g tartılarak alınmış ve çimentonun kütlesinin %25 - %30'u kadar su ile 3 dakika karıştırılarak çimento hamuru hazırlanmıştır. Karıştırma işleminden hemen sonra altında 12x12 cm boyutlarında cam bir levha üzerinde bulunan vicat halkasına içerisinde hava kalmayacak şekilde 1 dakika içerisinde üstü spatula ile düzeltilerek yerleştirilmiştir. Çimento hamuru vicat halkası içerisine yerleştirildikten sonra vicat sondası vicat halkasındaki çimento hamuru üst seviyesine 1 mm kalacak şekilde indirilerek hamur içerisine serbest bırakılmıştır. Sondanın kendi ağırlığı ile yavaş yavaş hamurun içerisine girmesi gözlenmiş ve cam levhaya 5-7 mm kaldığı an normal kıvam olarak tespit edilmiştir. Kontrol çimentosu PÇ 42,5 ile katkılı çimentolara ait standart kıvam deney sonuçları, Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Priz süresi tayini deneyi

Priz başlangıcı ve sona erme süreleri. TS EN 196-3 "Çimento Deney Metotları -Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini" standardına göre yapılmıştır. Deney için; RMU-Testing Equipment marka otomatik vicat aleti ve halkası, Toni Teknik marka karıştırıcı ve 0,1 g duyarlıkta Sartorius Basic marka elektronik terazi kullanılmıştır. Resim 3.2'de görülen otomatik vicat aleti, üzerine takılı olan özel kağıda çimento hamurunun priz başlangıcı ve priz sonunu kayıt etmektedir.

Standart kıvam tayininde kullanılan çimento hamurları, priz sürelerinin belirlenmesinde de kullanılmıştır. Vicat halkası, otomatik vicat aletine konulmuş ve vicat aletinin iğnesi temizlenerek her beş dakikada bir çimento hamuruna batacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra işlemin sağlıklı devam edebilmesi için iğnenin her batışından sonra iğne bir bez yardımıyla temizlenmiştir.

Burada çimento hamuruna batan iğnenin, cam levhaya 3-5 mm uzaklıkta kaldığı ana kadar geçen süre, priz başlangıcını vermektedir. Priz başlangıcından sonra her 5 dakikada bir iğnenin hamura batması devam etmiş ve iğnenin en çok çimento hamuruna 1 mm girdiği an, priz sona erme süresi olarak tespit edilmiştir. Otomatik vicat aletinde iğnenin her batışı, halkanın değişik yerlerine olmuş ve dıştan içe doğru çapı küçülen spiral bir şekilde batma işlemi devam etmiştir. Deneyler sonunda tespit edilen priz başlangıç ve sona erme süreleri, Çizelge 4.2'de verilmiştir.



Resiml 3.2. Otomatik vicat aleti

Hacim genişmesi deneyi

Hacim genişmesi deneyleri, TS EN 196-3 "Çimento Deney Metotları - Bölüm 3: Priz süresi ve genişleme tayini" (55) standardına göre yapılmıştır. Deneyde Le Chatelier aleti ve kaynatma kabı kullanılmıştır. Çimentoda serbest halde CaO (sönmemiş kireç) ve MgO bulunabilir. Bu maddeler, su ile reaksiyona girerek hacim artışına sebep olabilir ve betonda çatlaklar meydana getirebilir. Bu nedenle çimentolarda hacim genişmesi deneyi yapılması gerekir.

Deney için; normal kıvam deneyi için hazırlanan çimento hamurundan 20-30 g kadar kullanılmıştır. Çimento hamuru, 5x5 cm ebadındaki yağlanmış cam bir levha üzerine konulan yağlanmış olan Le Chatelier halkası içerisine hava boşluğu en az olacak şekilde yerleştirilmiştir. Hamurun üzeri spatula ile düzeltildikten sonra üst kısmı 5x5 cm ebadındaki cam levha ile kapatılmıştır. Alet üzerine cam levhanın kalkmaması için bir ağırlık konulduktan sonra çubuk uçlarının açıklığı ölçülmüştür (a). Le Chatelier aletinin durumu bozulmadan içerisinde sıcaklığı $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ olan su kabı içerisine bırakılmıştır. Le Chatelier aleti, 24 saat sonra su kabından çıkartılarak çubuk uçlarının açıklığı tekrar ölçülerek kaydedilmiştir (b). Sonra Le Chatelier aleti,

çubuklar yukarı gelecek şekilde su dolu kaynatma kabının içerisine yerleştirilmiş ve 30–45 dk. içerisinde kaynamaya başlayacak şekilde ısıtılmıştır. Kaynamaya 4 saat devam edilmiş ve kaynayan suyun buharlaşıp uçmaması için ağzı kapalı tutulmuştur. Le Chatelier aleti, bu sürenin sonunda kaynatma kabının içerisinden çıkarılmış ve laboratuvar sıcaklığına gelinceye kadar soğutularak çubuk uçlarının açıklığı bir kez daha ölçülmüştür (c). Toplam hacimsel genleşme katsayısı 10 mm^3 'yi geçmemelidir.

(b-a) , (c-b) ve (c-a) mm cinsinden ayrı ayrı hesaplanmıştır.

(c-a) mm cinsinden toplam hacim genleşmesi bulunmuştur.

$b-a \leq 4 \text{ mm}$ ve $c-a \leq 10 \text{ mm}$ olmalıdır.

Hacim genleşmesi deneyi, katkılı çimentolar ile PÇ 42,5 çimentosu için ayrı ayrı yapılmış ve deney sonuçları, Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Tane büyüklüğü (çimento inceliği) deneyi

Çimento incelik tayini deneyi, TS EN 196 - 6 "Çimento Deney Metotları - Bölüm 6: İncelik tayini" (42) standardına göre yapılmıştır. $105 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulmuş çimento numuneleri, 0,1 duyarlıkta Satorius Basic marka elektronik terazide 20 g tartılarak alınmıştır. 20 g.'lık numuneler, ayrı ayrı 40 μm , 90 μm ve 200 μm eleklerde 2500 Pa emiş gücü ile 3 dk. emiş gücü uygulanmıştır. Eleme işlemi sonunda, elekler üzerinde kalan miktarlar her seferinde tartılarak kaydedilmiştir. Elek üzerinde kalanlar, bir sonraki elek üzerine aktararak işleme devam edilmiş ve numunelerin tane büyüklükleri tespit edilmiştir.



Resim 3.3. Alpine marka incelik ölçüm cihazı

Deney, katkılı çimentolar ile PÇ 42,5 çimentosu için ayrı ayrı yapılmış ve deney sonuçları, Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Özgöl ağırlık deneyi

Çimentoların özgül ağırlık deneyleri, düz bir zemin üzerinde Le Chatelier balonu kullanılarak TS 24'e göre yapılmıştır. Le Chatelier balonunun iç kısmı, tamamen temizlenip etüvde kurutularak çıkartılmış ve balonun 0-1 mm ölçülü yerine kadar gaz yağı doldurulmuştur. Balon yaklaşık 20 °C oda sıcaklığında bekletilerek hacmi okunmuştur (V_1). Sonra çimento numunesinden 60 g alınmış, iç cidarına ve boğaz kısmına birikim yapmayacak şekilde balonun içine boşaltılmıştır. Sonra deriden yapılmış yumuşak bir taban üzerinde balon dairesel hareketlerle sarsılarak hava kabarcıklarının gaz yağı yüzeyine çıkması sağlanmıştır. Hava kabarcıkları tamamen bitene kadar sarsma işlemine devam edilmiş ve sonra balon laboratuvar sıcaklığında yaklaşık 1 saat bekletildikten sonra balon üzerindeki sıvı hacmi kaydedilmiştir (V_2). İlk okuma ile son okuma arasındaki fark, kullanılan çimento ile yer değiştiren sıvının hacmini vermiştir. Çimentonun özgül ağırlığı, aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$d = m / V_2 - V_1 \text{ (g / cm}^3 \text{)} \quad [3.1]$$

Formülde

d = Özgöl ağırlık (g/cm³)

m = Çimentonun ağırlığı (g)

V_1 = ilk okunan hacim (cm³)

V_2 = Son okunan hacim (cm³)`i ifade etmektedir.

Deney, katkılı çimentolar ile PÇ 42,5 çimentosu için in ayrı ayrı yapılmış ve deney sonuçları, Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Hava geçirgenlik (Blaine) deneyi

Özgöl yüzey deneyleri, Resim 3.4'te görülen Tonindustrie-Seger marka blaine cihazı kullanılarak TS EN 196-6 (42) standardına göre yapılmıştır. Blaine cihazı, hava geçirgenliği prensibine dayanarak çimentoların özgöl yüzeyini tayin etmek için kullanılan bir cihazdır. Deney numunesi miktarları, TS EN 196-6'da belirtilen hesaplama yöntemi ile belirlenerek etöv kurusu çimentolar üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.4. Tonindustrie-Seger marka blaine cihazı

Özgöl yüzey deneyi, katkılı çimentolar ile PÇ 42,5 çimentosu için ayrı ayrı yapılmış ve deney sonuçları, Çizelge 4.7' de verilmiştir.

$$S = (K/p) \times [\sqrt[3]{e^3/(1-e)}] \times (\sqrt{t}/\sqrt{0,1\eta}) \quad (\text{cm}^2/\text{g}) \quad [3.2]$$

Burada;

S = Özgöl yüzey (cm^2/g)

K = Cihaz sabiti,

e = Yatağın porozitesi,

t = Ölçülen zaman, (sn)

p = Çimentonun yoğunluğu (g/cm^3)

η = Çizelgeden alınan deney sıcaklığındaki havanın viskozitesi (Pa.s)'dir.

3.2.4. Çimentoların dayanım tayini deneyleri

Çimentoların dayanım deneyleri, TS 196-1'e uygun 16x16x4 cm boyutlarında üçlü çelik harç kalıpları kullanılarak yapılmıştır. Deneyler için 450 g çimento, 1350 g standart kum, 225 g içme suyu kullanılmış ve harç karışımları Ele marka harç karışım cihazında yapılmıştır.

Harç yapılırken; karıştırma kabına önce su konmuş, sonra çimentonun tamamı kaba dökülerek karıştırıcı 30 sn çalıştırılmıştır. Bu sürenin sonunda aynı hızla devam ederken 1350 g standart kum yavaş yavaş karışıma ilave edilmiş ve 1 dk. sonunda kumun tamamı karışıma boşaltılmıştır. Daha sonra karıştırıcı yüksek hıza alınıp 30 sn. daha çalıştırılmış ve toplam 1,5 dk. sonunda durdurulmuştur. Kabin yüzeyindeki harçlar kazınarak kabin üzeri nemli bir bezle örtülerek 75 sn bekletilmiştir. Daha sonra karıştırıcı yüksek hızda 1,5 dk. daha çalıştırılarak harç hazırlanmıştır. Kalıplara harç yerleştirme işlemi iki aşamada yapılmıştır. Önce kalıplar saniyede bir vuruş yapabilen otomatik sarsma tablasına yerleştirilmiş ve harcın, kalıp başlığı takılan kalıplara ilk olarak yarısı boşaltılmıştır. Sarsma makinesi çalıştırılarak

1 dk. içinde 60 vuruş yaptırılmıştır. Sonra kabın içinde kalan harcın tamamı kalıbın içine boşaltılmış ve sarsma makinesi, tekrar 1 dk. içinde 60 vuruş yapacak şekilde çalıştırılmıştır. Kalıplar daha sonra sarsma makinesinden alınarak, harçlar spatula ile sıkıştırılıp düzeltilmiş ve numunenin ismi üzerine yazılmıştır. Resim 3.5'de görülen içinde %90'dan fazla nispi nem bulunan bir numune kür dolabı içerisinde 20 ± 2 °C'de 24 saat bekletilmiştir.



Resim 3.5. Numune kalıbı kür dolabı

Bundan sonra kalıplardan çıkartılan harç prizmaları, kod numarası verildikten sonra 7, 28 ve 90. deney günlerine kadar Resim 3.6'da görülen kür havuzunda 20 ± 2 °C sıcaklık ile %100 nispi nem ortamında kür edilmiştir. Numunelerin içerisine konduğu kür havuzundaki su, 15 günde bir değiştirilmiştir. Numuneler, deneyden yaklaşık 20 dk. önce kür havuzundan çıkarılmış ve eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.



Resim 3.6. Numune kür havuzu

Eğilmede çekme dayanımı deneyi

Eğilmede çekme dayanımı deneyleri, Resim 3.7'de görülen ELE Autotest 250 marka eğilmede çekme ve basınç deney cihazı kullanılarak TS EN 196–1'e göre gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin tümünde cihazın yükleme hızı 0,05 kN/sn olarak alınmıştır. Her harç grubu için 3 deney numunesi kırılarak aritmetik ortalamaları dayanım değeri olarak kaydedilmiştir. Katkılı çimentolar ile PÇ 42,5 çimentosu harçlarının, 7, 28, 90. gün yaşlarındaki eğilmede çekme dayanımı sonuçları, Bölüm 4.8'de verilmiştir.



Resim 3.7. ELE Autotest 250 eğilmede çekme ve basınç deney cihazı

Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyleri, Şekil 3.7'de görülen ELE Autotest 250 marka eğilmede çekme ve basınç deney cihazı kullanılarak TS 24'e göre yapılmıştır. Deney, eğilmede çekme dayanımı deneyi uygulanarak ortadan ikiye bölünen harç prizmaları üzerinde, bu deneyden hemen sonra gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin tümünde cihazın yükleme hızı 0,5 kN/sn olarak alınmıştır. Deney sonuçları, deney numunelerinin 7., 28. ve 90. gün yaşlarında dayanım değerleri kırıldıktan sonra aritmetik ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Katkılı çimentolar ile PÇ 42,5 çimentosu harçlarının 7, 28 ve 90. gün yaşlarındaki basınç dayanımı sonuçları, Bölüm 4.9'da verilmiştir.

4. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Kimyasal Kompozisyon

Üretilen kompoze çimentolar ile kontrol çimentosu olan PÇ 42,5 çimentolarının kimyasal analizleri, TS EN 197-1 “Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri” (44) standardı sınır değerleri ile birlikte Çizelge 4.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. PÇ 42,5 ile kompoze çimentoların kimyasal analizleri

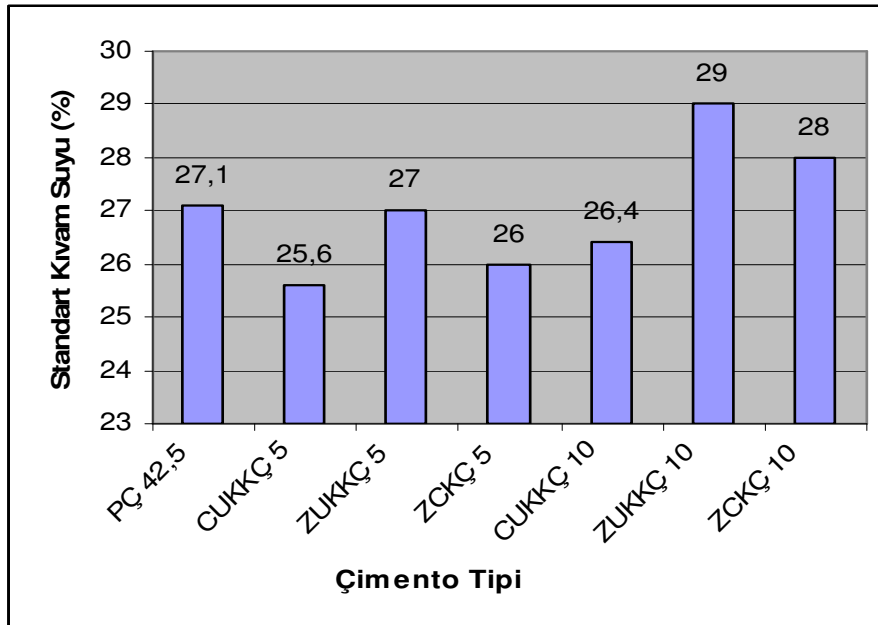
Kimyasal Analiz (%)	PÇ 42,5	CUKKÇ 5	ZUKKÇ 5	ZCKÇ 5	CUKKÇ 10	ZUKKÇ 10	ZCKÇ 10	TS EN 197-1 (44)
CaO	62,72	59,92	59,25	57,37	56,49	56,83	52,64	-
SiO ₂	20,00	21,87	21,18	24,06	24,15	23,44	29,04	-
Al ₂ O ₃	4,92	5,11	5,51	5,45	4,86	5,97	5,55	-
Fe ₂ O ₃	3,76	3,19	3,30	3,17	3,03	3,24	2,95	-
MgO	1,84	2,05	1,93	2,07	2,20	1,91	2,18	En çok 5,0
SO ₃	2,65	3,56	3,56	2,83	4,4	4,18	2,79	En çok 5,0
K ₂ O	0,73	0,73	0,96	0,86	0,90	1,04	0,89	-
Na ₂ O	0,26	1,28	0,77	1,25	1,76	0,65	1,64	-
Kızdırma Kaybı	2,54	2,22	2,46	2,02	2,31	3,34	2,50	En çok 5,0

Magnezi (MgO) ve sülfirik asidi anhidridi, çimentoda hacim sabitliğini bozan maddelerdir. Bu bileşenler, çimento içinde belirli değerden daha fazla miktarda olmaları durumunda zararlı etkiler oluştururlar. Üretilen kompoze çimentoların kimyasal analizleri (Çizelge 4.1) incelendiğinde, hacim sabitliğini bozan bileşenlerin, standartta belirtilen sınır değerlerden daha düşük olduğu

görülmüştür. Kızdırma kaybı değerlerinde, kompoze çimentoların kızdırma kaybı değerleri, ZCKÇ 10 hariç, kontrol çimentosuna göre daha düşük çıkmıştır. Bu çalışmada üretilen kompoze çimentolar, kimyasal analiz bakımından TS EN 197–1 standardına uygundur.

4.2. Standart Kıvam Suyu

Üretilen kompoze çimentolar ile PÇ 42,5 çimento hamurlarının standart kıvam su ihtiyaçları Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, kompoze çimentolarda zeolit miktarı arttıkça normal kıvam suyu artmaktadır. En yüksek kıvam suyu ihtiyacı, ZUKKÇ 10’da tespit edilmiştir. Ayrıca, kompoze çimentoların standart kıvam suyu ihtiyaçlarının, ZUKKÇ 10 ve ZCKÇ 10 hariç, kontrol çimentosundan daha az olduğu görülmektedir. Bu çimentoların standart kıvam suyunun yüksek olmasının nedeni, her iki çimentonun da özgül yüzeylerinin yüksek olması dolayısıyla daha çok suya ihtiyaç göstermesidir.



Şekil 4.1. Çimentoların standart kıvam suyu değerleri

4.3. Priz Süreleri

Üretilen kompoze çimentolar ile PÇ 42,5 çimentosunun priz süreleri, diğer fiziksel özelliklerle birlikte Çizelge 4.2 'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. PÇ 42,5 ile kompoze çimentoların fiziksel özellikleri

Çimentolar	Fiziksel özellikler							
	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Özgül Yüzey (blaine) (cm ² /g)	200 µm elek üstü kalan (%)	90 µm elek üstü kalan (%)	40 µm elek üstü kalan(%)	Priz başlangıcı (Saat:dk)	Priz sonu (Saat:dk)	Hacim genleşmesi (mm)
PÇ 42,5	3,13	3800	0,0	1,0	17,5	1:45	3:20	2
CUKKÇ 5	2,97	4070	0,0	1,5	18,5	1:10	2:45	1
ZUKKÇ 5	3,03	4900	0,0	2,5	21	1:35	2:55	1
ZCKÇ 5	2,96	4380	0,0	4,5	25,5	2:40	3:30	1
CUKKÇ 10	2,89	4430	0,0	2,0	20,0	1:25	2:55	1
ZUKKÇ 10	2,96	5410	0,0	2,0	20,5	2:05	3:00	1
ZCKÇ 10	2,90	4890	0,0	4,0	23,0	2:45	3:45	1
TS EN 197-1	-	En az 2800	-	-	-	En az 1	En geç 10	En çok 10

Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi bütün çimentoların priz süreleri, TS EN 197-1'de belirtilen sınır değerler içinde yer almaktadır. Bununla birlikte ZUKKÇ 10 ile ZCKÇ 10 çimentolarının priz başlangıcı, ZCKÇ 5 ile ZCKÇ 10 çimentolarının priz sonu değerleri, kontrol çimentosundan daha yüksektir. Zeolitin standart kıvam suyunu arttırması sebebiyle priz sürelerinde de artışlar meydana gelmiştir.

4.4. Hacim Genleşmesi

Üretilen kompoze çimentolar ile PÇ 42,5 çimentosunun hacim genleşmesi değerleri, Çizelge 4.2'de görülmektedir. Görüldüğü gibi kontrol çimentosu ile

Üretilen kompoze çimentoların hacim genleşmesi değeri standart sınır değeriiden düşüktür.

4.5. Tane Büyüklüğü (Elek Analizi)

Üretilen kompoze çimentoların tane büyüklüğü ile ilgili olan 200 µm elek üstü, 90 µm elek üstü ve 40 µm elek üstünde kalan imento miktarları, Çizelge 4.2’de görölmektedir. Buna göre çimentolarda 200 µm elek üstünde malzeme kalmadığı, 90 µm ve 40 µm elek üstü değeriinde ise birbirine yakın sonuçların elde edildiğı görölmüşür.

4.6. Özgöl Ağırlık

Üretilen kompoze çimentoların özgöl ağırlık değeri, diğeri fiziksel özelliklerle birlikte Çizelge 4.2’de verilmiştir. Göröldüğü gibi üretilen kompoze çimentoların özgöl ağırlık değeri, kontrol imentosu olan PÇ 42,5’den daha düşüktür. Bunun sebebi ise, puzolanların özgöl ağırlıklarının düşük olmasıdır. En düşük özgöl ağırlık, CUKKÇ 10’da elde edilmiştir.

4.7. Özgöl Yüzey

Üretilen kompoze çimentolar ile kontrol çimentosunun özgöl yüzey değeri, Çizelge 4.2.’de verilmiştir. Çizelge 4.2’de göröldüğü gibi çimentodaki zeolit miktarı arttıkça özgöl yüzey değeri de artmaktadır. En yüksek özgöl yüzey değeri, sırasıyla ZUKKÇ 10 VE ZCKÇ 10’da elde edilmiştir. Zeolitin imentonun öğütülebilirliğini arttırdığı söylenebilir.

4.8. Eğilmede Çekme Dayanımı

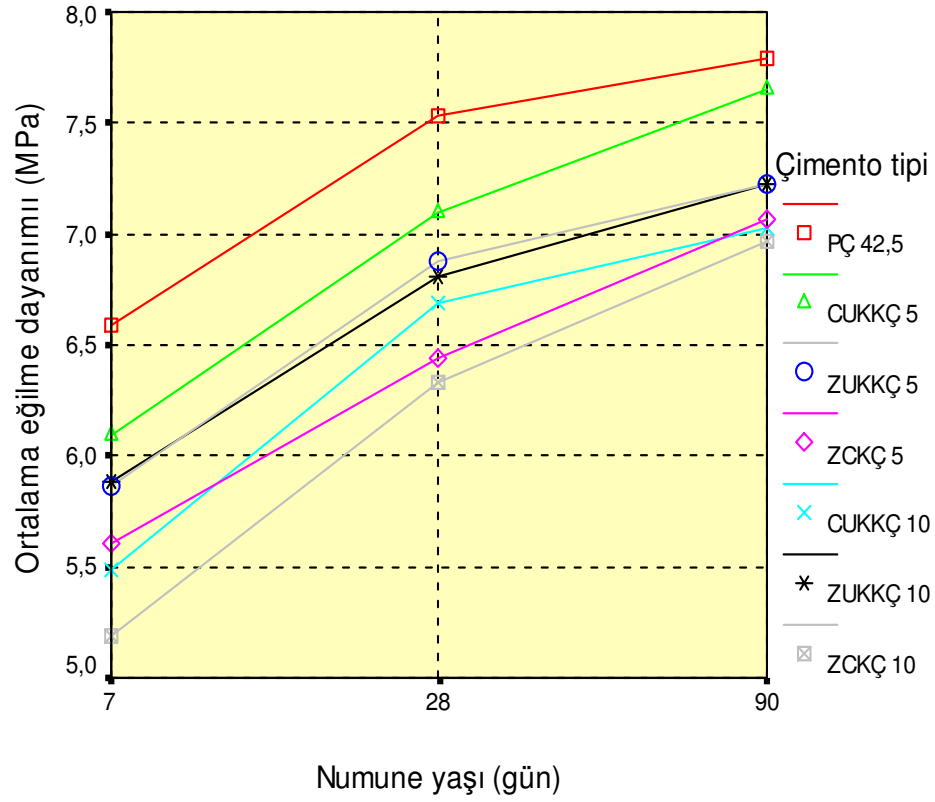
Üretilen kompoze çimentolar ile kontrol çimentosunun eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçları ve açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Ayrıca çimentoların eğilmede çekme dayanımı – numune yaşı ilişkisi Şekil 4.2’te görülmektedir.

Çizelge 4.3. Eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler

Numune Yaşı (Gün)	Çimento tipi	Ortalama (MPa)	Std. Hata	Min.	Maks.
7	PÇ 42,5	6,5900	,1380	6,38	6,85
	CUKKÇ 5	6,0933	,1374	5,88	6,35
	ZUkkÇ 5	5,8667	,1841	5,60	6,22
	ZCKÇ 5	5,6100	,1964	5,43	5,76
	CUKKÇ 10	5,4900	,1940	5,14	5,81
	ZUkkÇ 10	5,8800	,1185	5,68	6,09
	ZCKÇ 10	5,1867	,1488	4,91	5,42
28	PÇ 42,5	7,5300	,1510	7,23	7,71
	CUKKÇ 5	7,1000	,1185	6,90	7,31
	ZUkkÇ 5	6,8800	,1501	6,62	7,14
	ZCKÇ 5	6,4433	,1670	6,22	6,77
	CUKKÇ 10	6,6933	,2085	6,41	7,10
	ZUkkÇ 10	6,8033	,1507	6,51	7,01
	ZCKÇ 10	6,3267	,1586	6,02	6,55
90	PÇ 42,5	7,7900	,1015	7,59	7,92
	CUKKÇ 5	7,6500	,1185	7,44	7,85
	ZUkkÇ 5	7,2300	,1493	6,95	7,46
	ZCKÇ 5	7,0667	,1186	6,87	7,28
	CUKKÇ 10	7,0300	,1905	6,70	7,36
	ZUkkÇ 10	7,2233	,1335	6,98	7,44
	ZCKÇ 10	6,9633	,1837	6,76	7,33

Deney sonucunda elde edilen veriler üzerinde her bir zaman aralığında çimento tipleri arasında varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonuçlarına göre çimento tiplerine bağlı olarak eğilmede çekme dayanımı değerlerinin $p = 0,05$ anlamlılık düzeyinde birbirinden farklı olduğu görülmüştür (Çizelge 4.4).



Şekil 4.2. Çimentolarda eğilmede çekme dayanımı – numune yaşı ilişkisi

Çizelge 4.4. Eğilmede çekme dayanımı değerleri bakımından çimento tiplerinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi

Numunenin Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık düzeyi (p)
7	Gruplar arası	3,682	6	,614	9,243	,000
	Gruplar içi	,930	14	,664		
	Toplam	4,612	20			
28	Gruplar arası	2,962	6	,494	6,451	,002
	Gruplar içi	1,071	14	,765		
	Toplam	4,034	20			
90	Gruplar arası	1,833	6	,305	4,798	,007
	Gruplar içi	,891	14	,637		
	Toplam	2,724	20			

Farklılığın hangi çimento tiplerinden kaynaklandığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen “Duncan” çoklu karşılaştırma testi sonuçları Çizelge 4.5’te görülmektedir.

Çizelge 4.5. Eğilmede çekme dayanımı değerlerine ait çoklu karşılaştırma (duncan) testi sonuçları

Numune Yaşı (Gün)	Çimento tipi	Farklı olan gruplar (p=0,05)			
		1	2	3	4
7	ZCKÇ 10	5,19			
	CUKKÇ 10	5,49	5,49		
	ZCKÇ 5	5,61	5,61	5,61	
	ZUKKÇ 5		5,87	5,87	
	ZUKKÇ 10		5,88	5,88	
	CUKKÇ 5			6,09	
	PÇ 42,5				6,59
28	ZCKÇ 10	6,33			
	ZCKÇ 5	6,44	6,44		
	CUKKÇ 10	6,69	6,69	6,69	
	ZUKKÇ 10	6,80	6,80	6,80	
	ZUKKÇ 5		6,88	6,88	
	CUKKÇ 5			7,10	7,10
	PÇ 42,5				7,53
90	ZCKÇ 10	6,96			
	CUKKÇ 10	7,03			
	ZCKÇ 5	7,07			
	ZUKKÇ 10	7,22	7,22		
	ZUKKÇ 5	7,23	7,23		
	CUKKÇ 5		7,65	7,65	
	PÇ 42,5			7,79	

Eğilmede çekme dayanımı deneyi sonucunda elde edilen veriler üzerinde çimento tipleri arasında yapılan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

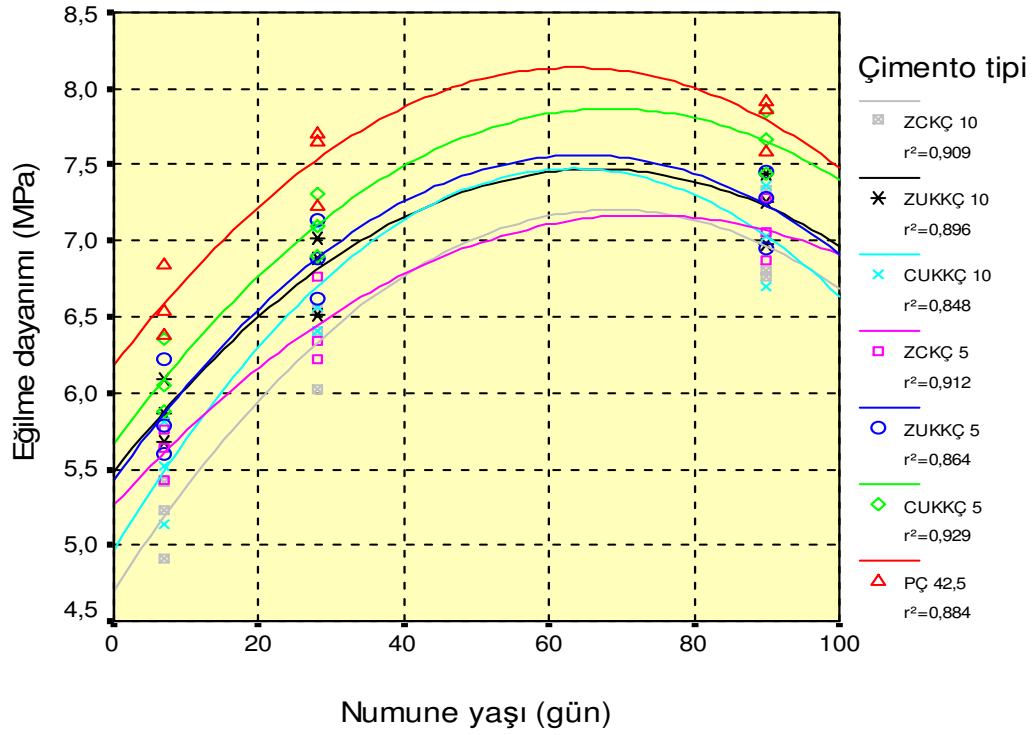
- 7, 28 ve 90. günlerde ZCKÇ 10 çimentosunun en düşük eğilmede çekme dayanımına sahip olduğu,
- Bütün numune yaşlarında PÇ 42.5 çimentosunun en yüksek eğilmede çekme dayanımına sahip olduğu,

- Bütün numune yaşlarında ZCKKÇ 5, ZCKÇ 10 ve CUKKÇ 10 çimentolarının eğilmede çekme dayanımı değerlerinin istatistik olarak birbirinden farklı olmadığı,
- PÇ 42.5 ve CUKKÇ 5 çimentolarının eğilmede çekme dayanımı değerlerinin istatistik olarak birbirinden farklı olmadığı,
- Kompoze çimentolar arasında CUKKÇ 5 çimentosunun bütün numune yaşlarında en yüksek eğilmede çekme dayanımı değerine sahip olduğu, görülmüştür.

Ayrıca numunelerin zamana bağlı olarak eğilmede çekme dayanımındaki değişimi modelleyebilmek için regrasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen regrasyon analizi sonucunda numune yaşı - eğilmede çekme dayanımı arasındaki ilişki ikinci dereceden $Y = b_0 + b_1X + b_2X^2$ model denklemi ile açıklanabilmektedir. Çimento tiplerine göre oluşturulan regrasyon modellerine ilişkin istatistikler Çizelge 4.6'da, numune yaşı ile eğilmede çekme dayanımı arasındaki ilişki grafiği ise Şekil 4.5 'te verilmiştir.

Çizelge 4.6. Numune yaşı ile eğilmede çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren regrasyon modelleri

Çimento tipi	Regrasyon katsayısı (r^2)	Regrasyon denklemi ($Y = b_0 + b_1X + b_2X^2$)	Anlamlılık düzeyi (p)
PÇ 42,5	0,884	$Y = 6,1809 + 0,0619.X - 0,0005.X^2$	0,05
CUKKÇ 5	0,930	$Y = 5,6655 + 0,0644.X - 0,0005.X^2$	0,05
ZUKKÇ 5	0,864	$Y = 5,4283 + 0,0662.X - 0,0005.X^2$	0,05
ZCKÇ 5	0,912	$Y = 5,2623 + 0,0522.X - 0,0004.X^2$	0,05
CUKKÇ 10	0,848	$Y = 4,9664 + 0,0792.X - 0,0006.X^2$	0,05
ZUKKÇ 10	0,896	$Y = 5,4844 + 0,0597.X - 0,0004.X^2$	0,05
ZCKÇ 10	0,909	$Y = 4,7027 + 0,0728.X - 0,0005.X^2$	0,05



Şekil 4.3. Numune yaşı ile eğilmede çekme dayanımı arasındaki ilişki

4.9. Basınç Dayanımı

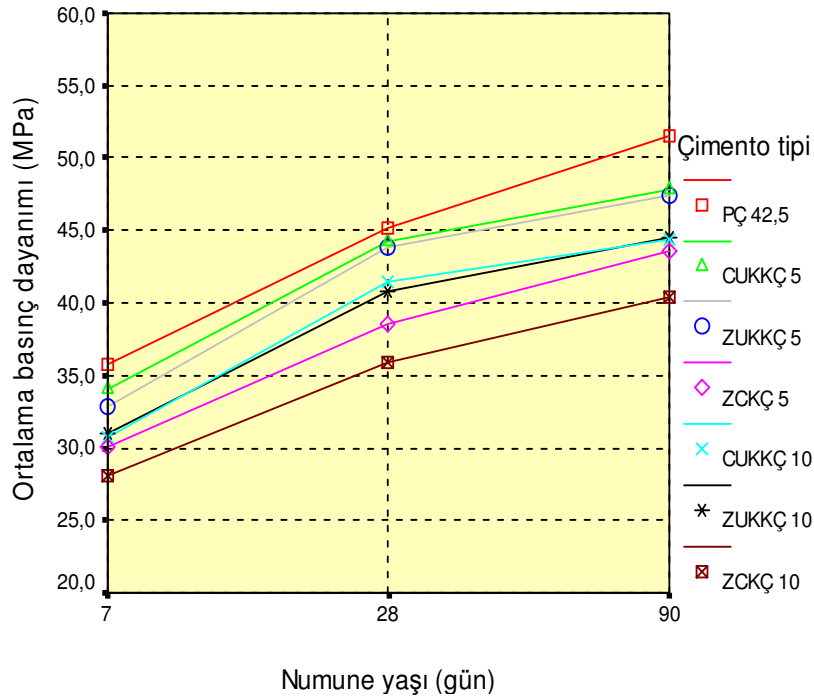
Üretilen kompoze çimentolar ile kontrol çimentosunun basınç dayanımı deneyi sonuçları ve açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.7’de verilmiştir. Ayrıca çimentoların basınç dayanımı – numune yaşı ilişkisi Şekil 4.4’te görülmektedir.

Çizelge 4.7. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler

Numune Yaşı (Gün)	Çimento tipi	Ortalama (MPa)	Std. Hata	Min.	Maks.
7	PÇ 42,5	35,75	,3396	35,05	36,81
	CUKKÇ 5	34,09	,1195	33,85	34,52
	ZUKKÇ 5	32,86	,2840	32,03	33,62
	ZCKÇ 5	30,08	,5439	28,53	31,90
	CUKKÇ 10	30,71	,3061	29,58	31,33
	ZUKKÇ 10	31,05	,2626	30,41	31,86
	ZCKÇ 10	28,05	,4599	26,44	29,24

Çizelge 4.7. (Devam) Basınç dayanımı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler

Numune Yaşı (Gün)	Çimento tipi	Ortalama (MPa)	Std. Hata	Min.	Maks.
28	PÇ 42,5	45,22	,2599	44,38	45,85
	CUKKÇ 5	44,25	,1995	43,69	44,82
	ZUKKÇ 5	43,81	,2875	42,96	44,68
	ZCKÇ 5	38,50	,3718	37,94	39,93
	CUKKÇ 10	41,48	,3634	40,24	42,30
	ZUKKÇ 10	40,76	,1964	40,17	41,26
	ZCKÇ 10	35,87	,1702	35,26	36,22
90	PÇ 42,5	51,49	,3600	50,15	52,13
	CUKKÇ 5	47,86	,4844	46,85	49,53
	ZUKKÇ 5	47,41	,2654	46,88	48,41
	ZCKÇ 5	43,54	,5616	41,56	44,95
	CUKKÇ 10	44,38	,8598	42,13	47,44
	ZUKKÇ 10	44,56	1,8718	38,34	49,11
	ZCKÇ 10	40,42	,4373	39,50	41,88



Şekil 4.4. Ortalama basınç dayanımı değerlerine ait çizgi grafik

Deney sonucunda elde edilen veriler üzerinde her bir zaman aralığında çimento tipleri arasında varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi sonuçlarına göre çimento tiplerine bağlı olarak basınç dayanım değerlerinin $p=0,05$ anlamlılık düzeyinde birbirinden farklı olduğu görülmüştür (Çizelge 4.8.).

Çizelge 4.8. Basınç dayanımı değerleri bakımından çimento tiplerinin karşılaştırılmasına ait varyans analizi

Numunenin Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık düzeyi (p)
7	Gruplar arası	203,732	6	33,955	54,005	,000
	Gruplar içi	17,605	28	,629		
	Toplam	221,337	34			
28	Gruplar arası	340,034	6	56,672	150,296	,000
	Gruplar içi	10,558	28	,377		
	Toplam	350,592	34			
90	Gruplar arası	383,662	6	63,944	17,268	,000
	Gruplar içi	103,683	28	3,703		
	Toplam	487,345	34			

Farklılığın hangi çimento tiplerinden kaynaklandığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen “Duncan” çoklu karşılaştırma testi sonuçları Çizelge 4.9.’da görülmektedir.

Çizelge 4.9. Basınç dayanımı değerlerine ait çoklu karşılaştırma (Duncan) testi sonuçları

Numune Yaşı (Gün)	Çimento tipi	Farklı olan gruplar ($p=0,05$)				
		1	2	3	4	5
7	ZCKÇ 10	28,05				
	ZCKÇ 5		30,08			
	CUKKÇ 10		30,71			
	ZUKKÇ 10		31,05			
	ZUKKÇ 5			32,86		
	CUKKÇ 5				34,09	
	PÇ 42,5					35,75

Çizelge 4.9. (Devam) Basınç dayanımı değerlerine ait çoklu karşılaştırma (Duncan) testi sonuçları

Numune Yaşı (Gün)	Çimento tipi	Farklı olan gruplar (p=0,05)				
		1	2	3	4	5
28	ZCKÇ 10	35,87				
	ZCKÇ 5		38,50			
	ZUKKÇ 10			40,76		
	CUKKÇ 10			41,48		
	ZUKKÇ 5				43,81	
	CUKKÇ 5				44,25	
	PÇ 42,5					45,22
90	ZCKÇ 10	40,42				
	ZCKÇ 5		43,54			
	CUKKÇ 10		44,38			
	ZUKKÇ 10		44,56			
	ZUKKÇ 5			47,41		
	CUKKÇ 5			47,86		
	PÇ 42,5				51,49	

Basınç dayanım deneyi sonucunda elde edilen veriler üzerinde çimento tipleri arasında yapılan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre;

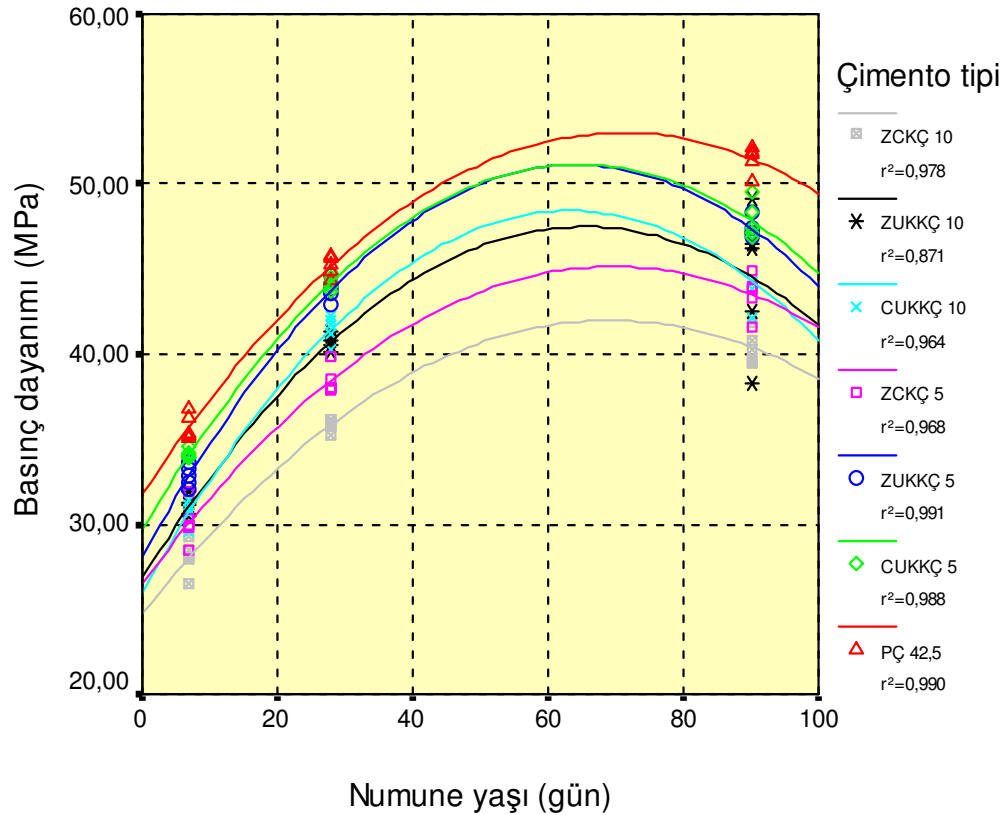
- 7, 28 ve 90. günlerde ZCKÇ 10 çimentosunun en düşük basınç dayanımı değerine sahip olduğu,
- Bütün numune yaşlarında, ZUKKÇ 10 ve CUKKÇ 10 çimentolarının basınç dayanımı değerlerinin istatistik olarak birbirinden farklı olmadığı,
- 7, 28 ve 90. günlerde kompoze çimentolar arasında CUKKÇ 5 çimentosunun en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu,
- Beklenilenin aksine, kompoze çimentoların 90 günlük basınç dayanım değerlerinin, kontrol çimentosunun altında olduğu görülmüştür.

Ayrıca numunelerin zamana bağlı olarak basınç dayanımındaki değişimi modelleyebilmek için regrasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen regrasyon analizi sonucunda numune yaşı-basınç dayanımı arasındaki ilişki ikinci dereceden $Y = b_0 + b_1X + b_2X^2$ model denklemi ile açıklanabilmektedir. Çimento tiplerine göre oluşturulan regrasyon modellerine ilişkin istatistikler

Çizelge 4.10'da, numune yaşı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki grafiği ise Şekil 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.10. Numune yaşı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren regrasyon modelleri

Çimento tipi	Regrasyon katsayısı (r^2)	Regrasyon denklemi ($Y = b_0 + b_1X + b_2X^2$)	Anlamlılık düzeyi (p)
PÇ 42,5	0,993	$Y = 31,7626 + 0,5989.X - 0,0042.X^2$	0,05
CUKKÇ 5	0,963	$Y = 29,6965 + 0,6636.X - 0,0051.X^2$	0,05
ZUKKÇ 5	0,951	$Y = 28,1131 + 0,7169.X - 0,0056.X^2$	0,05
ZCKÇ 5	0,980	$Y = 26,5212 + 0,5356.X - 0,0039.X^2$	0,05
CUKKÇ 10	0,946	$Y = 26,0222 + 0,7093.X - 0,0056.X^2$	0,05
ZUKKÇ 10	0,983	$Y = 26,8615 + 0,6316.X - 0,0048.X^2$	0,05
ZCKÇ 10	0,979	$Y = 24,7326 + 0,4986.X - 0,0036.X^2$	0,05



Şekil 4.5. Numune yaşı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doğal puzolan olarak Manisa-Gördes yöresine ait zeolit, yapay puzolan olarak Kemerköy santralinden alınan uçucu kül ve atık camın çimentoda kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler, aşağıda sıralanmıştır:

1. Atık cam malzemesi, zeolit ve uçucu kül ile çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilir.
2. Zeolit, uçucu kül ve atık cam, ikili karışımlar olarak % 5 ve % 10 oranlarında çimentoda katkı malzemesi olarak kullanılabilir.
3. Üretilen kompoze çimentolarda standart kıvam suyu ihtiyacı, zeolit oranı artışı ile artmaktadır.
4. Üretilen kompoze çimentoların priz başlama ve sona erme süreleri ile hacim genleşmeleri TS EN 197-1 standardına uygundur.
5. Zeolitin, çimentonun öğütülebilirliğini kolaylaştırdığı tespit edilmiştir.
6. Puzolanların, özgül ağırlıklarının düşük olması sebebiyle, üretilen çimentoların özgül ağırlık değerleri de azalmıştır.
7. Kompoze çimentolar arasında CUKKÇ 5 çimentosunun bütün numune yaşlarında en yüksek eğilmede çekme dayanımı değerine sahip olduğu ayrıca, 7, 28 ve 90. günlerde ZCKÇ 10 ve CUKKÇ 10 çimentosunun en düşük eğilmede çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.
8. 7, 28 ve 90. günlerde sırasıyla PÇ 42,5 ve CUKKÇ 5 çimentolarının en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür.
9. Çalışmada kullanılan camın alkali miktarının yüksek olmasından dolayı, harçlarda Alkali Silika Reaksiyonu (ASR) oluşumu ile ilgili konunun araştırılması yararlı olacaktır

KAYNAKLAR

1. Aruntaş, H.Y., "Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-55 (1996).
2. Roumain, J.C., Sarkar, S.L., II International Symposium on Cement and Concrete Technology in the 2000, Yeğinobalı, A., "21. Umain, J.C., Sarkar, S.L., II International Symposium on Cement and Concrete Technology in the 2000, (Çev. Yeğinobalı, A.) "21. Yüzyılın Çimentoları", **Çimento ve Beton Dünyası**, 5 (30): 36-45 (2001).
3. Nagataki, S., and Wu, C., "A Study Portland Incorporating Silica Fume And Blast Furnace Slag, Fly Ash, Slag, Silica Fume And Natural Puzzolan-Proceedings", Fifth International Conference-SP-153-2, **American Concrete Institute**, 1051-1068 (1995).
4. Aruntaş, H.Y. ve Tokyay, M., "Katkılı Çimento Üretiminde Diatomitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği", **Çimento ve Beton Dünyası**, Ankara, 1(4):33-41 (1996).
5. Postacıoğlu, B., "Bağlayıcı Maddeler", Cilt 1, **Teknik Kitaplar Yayınevi**, İstanbul, 5-38 (1986).
6. Snell, L.M. and Snell, B.G., "The Early Roots of Cement", **Concrete International**, 83-85 (2000).
7. "Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri", **DPT Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Özel İhtisas Komisyonu Raporu**, Ankara, 2:14-27 (2001).
8. Mindess, S. And Young, J.F., "Concrete", **Prentice-Hall Inc.**, New Jersey, 41-94 (1981).
9. Neville, A.M., "Properties of Concrete", **Longman Scientific & Technical**, İngiltere, 36-115 (1981).
10. ASTM C 114, Standart Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement, **Annual Book of ASTM Standards**, 28-65 (1993).
11. Feldman, R.F. and Serada, P.J., "A model for hydrated portland cement paste as deducted from sorption-length change and mechanical properties", **Materials and Structures**, 6: 509-519 (1968).
12. Bye, G.C., "Portland Cement", **Pergamon Press, Oxford**, 15-56 (1983).

13. ASTM C 125, "Standart Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates", **Annual Book of ASTM Standards**, 2-8(1994).
14. ASTM C 618, Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, **Annual Book of ASTM Standards**, 5-11 (1994).
15. Vitruvius, A., "The Ten Books of Architecture", **Leonard N. Stern Publication**, New York, 48-87 (1960).
16. Davidovitz, J., "Ancient and Modern Concretes: What is the difference:", **Concrete International, ACI**, 23-25. (1987).
17. Ramachandran, V.S., "Concrete Admixtures Handbook", **Noyes Publication**, New Jersey, ABD,114-159 (1995).
18. Leckebush, R., "Türkiye'deki doğal pozolanların çimento katkı maddesi olarak kullanımı", **Çimento Araştırma ve Geliştirme Merkezi**, Ankara, 1-10 (1984).
19. Aruntaş, H.Y., "Diatomit, özellikleri, kullanım alanları, inşaat sektöründeki yeri", **Çimento ve Beton Dünyası**, Ankara, 4:27-31 (1996).
20. TS 25, "Tras", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (1975).
21. Erdoğan, T.Y., "Beton", **ODTÜ Yayınları**, Ankara,175-177 (2003).
22. Okucu, A., "Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) yörelerindeki zeolitik ve perlitik tüflerin pozolanik özellikleri", Doktora Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bil. Enst.**, Balıkesir, 1-54 (1998).
23. Tokyay, M., Erdoğan, K., "Cürufklar ve cürufllu çimentolar", **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, T.Ç.M.B./AR-GE/Y97.2**, Ankara, 1-2 (1997).
24. Mehta, P.K., "Concrete Structure Properties and Materials", **Prentice-Hall, Inc.**, Englewood Cliffs, New Jersey, 35-94 (1986).
25. Yeğinobalı, A., "Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı", **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, T.Ç.M.B./AR-GE/01.01**, Ankara, 1-3 (2001).

26. Mazsazza, F., Puzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları, *Seminer, TÇMB*, Ankara, 41-79 (1989).
27. Prince, W.H., "Puzzolans-A Review", *ACI Journal*, , Detroit, 225-232 (1975).
28. Şimşek, O., "Beton ve Beton Teknolojisi", *Seçkin Yayınevi*, Ankara, (2004).
29. Sarıiz, K. ve Nuhoğlu, İ., "Endüstriyel Hammadde Yatakları ve Madenciligi", *Anadolu Üniversitesi*, Eskişehir, 3-36(1992).
30. Erdem, E., Donat R. ve Çetişli, H., "Zeolit Katkılı Çimentoların Hidratasyon ve Mekanik Özellikleri", *Çimento ve Beton Dünyası*, Ankara, (17): 22-28 (1999).
31. Sheppard, R.A., "Tortul Kayalardaki Zeolitler", *Yeryuvarı ve İnsan*, (1980).
32. Çetinel, G., Dünyada ve Türkiye'de Zeolit, , *M.T.A. Fizibilite Etütleri Dairesi*, Ankara, 37-55 (1993).
33. Gürel, O., Moleküler Eleklerde Adsorpsiyon Termodinamiği, Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi*, Ankara, 76-80 (1977).
34. Mumpton, F.A., "World Wide Deposits and Utulisation of Natural Zeolites", *Industrial Zeolites*, 2-11 (1973).
35. Tokyay, M. ve Erdoğan, K., "Uçucu Küllerin Karakterizasyonu", *TÇMB AR-GE/Y 98.3*, (1998).
36. Roy, D.M., Luke, K. and Diamond, S., "Characterization of Fly Ash and Its Reaction in Concrete," *Proceedings, Materials Research Society*, Pittsburg, 51-68 (1984).
37. Ane, R.O. and Best J.F., "Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete," *Concrete International, ACI*, 80 -92 (1982).
38. ASTM C 618, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, 154-185 (1994).
39. ACI Committee 226. 3R - 87, "Use of Fly Ash in Concrete", *American Concrete Institute*, Detroit, 40-74 (1990).

40. Abdun-Nur, E.A., "Fly Ash in Concrete". **An Evulation Highway Research Board Bulletin**, Washington D.C., 28: 17-28 (1961).
41. Kocabağ, D., "Cam kimyası-uygulanması-özellikleri", *Birsen Yayınevi*, 2-19 (2002).
42. Artel, T., "Yapı malzemesi", **Osman Yalçın Matbaası**, 115-138 (1969).
43. Eriç, M., "Yapı fiziği ve malzemesi", **Literatür Yayıncılık**, 276-288, (2002).
44. İnternet: Cam geri kazanımı hem ekolojik hem de ekonomik. [\(2005\)](http://www.bcm.org.tr/pdf/Cam.ekonomik.pdf.).
45. Erdin, E."Tek Kere mi Çok Kere mi Kullanım Bir Ekolojik Ekonomik Yaklaşım". *Ekoloji Çevre Dergisi*, 1(2): 3-6 (1992).
46. İnternet: Cam, Cam Ambalaj ve Cam Kırığı Nedir? http://www.camsiad.org.tr/camambalaj_detay.asp, (2005).
47. Mon, M., "Portland-Pfa Cement; Comarison Between Intergrinding and Blending", **Magazine of Concrete Research**, 35: 124-129 (1983).
48. Gökçe, A., Uyan, M., Öztekin, M., "İnceliğe Bağlı Olarak Uçucu Küllü Betonların Su İhtiyacındaki Değişim", **4.Ulusal Beton Kongresi**, TMMOB İstanbul Şubesi, 431 (1996).
49. Akman, S., "Traslı çimento nedir-ne değildir", **TMMOB Yayını**, Panel, Ankara.
50. Yılmaz, K., ve diğ., "Taban Külü Ve Doğal Zeolitin Puzolanik Çimentoda Katkı Olarak Kullanımı", **Beton 2004 Kongresi**, İstanbul, 716-725 (2004).
51. Okucu, A., "Zeolitik Tüflerin Çimento Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi", **Beton 2004 Kongresi**, İstanbul, 682-687 (2004).
52. Wiens, U. ve diğ., "Influence Of High Silica Fume And High Fly Ash Contents On Alkalinity Of Pore Solution And Protection Of Steel Againts Corrosion", Fly Ash, Silica Fume, Slag And Natural Pozzolans İn Concrete-Proceedings, **American Concrete Institute**, 741-761 (1995).
53. TS EN 196-2, "Çimento Deney Metotları – Bölüm2: Çimentonun kimyasal analizi", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2002).
54. TS EN 196-1, "Çimento Deney Metotları – Bölüm1: Dayanım tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2002).

55. TS EN 196-3, “Çimento Deney Metotları – Bölüm3: Priz süresi ve genleşme tayini”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2002).
56. TS EN 196-6, “Çimento Deney Metotları – Bölüm6: İncelik tayini”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2000).
57. TS EN 197–1 “Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2002).

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında İzmir’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İzmir’de tamamladı. 1997 yılında Abant İzzet Baysal Üniversitesi Düzce Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü’nde lisans öğrenimine başladı. 2001 yılında lisans öğrenimini başarı ile tamamlayarak Yapı Öğretmenliği Bölümü Teknik Öğretmeni olarak mezun oldu. 2002 yılında Abant İzzet Baysal Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2003 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitime başladı. Halen yüksek lisans eğitime Gazi Üniversitesi Yapı Eğitimi Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak devam etmektedir.