

**FARKLI TİPTEKİ PUZOLANLARIN BETONUN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Erkan YILDIZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

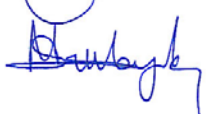
MART 2006

ANKARA

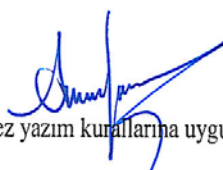
Erkan YILDIZ tarafından hazırlanan FARKLI TİPTEKİ PUZOLANLARIN
BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ adlı bu tezin Yüksek Lisans
Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ
Tez Yöneticisi

Bu çalışma jürimiz tarafından Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi
olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Metin ARSLAN 
Üye : Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ 
Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet SARIBIYIK 
Üye :
Üye :

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



**FARKLI TİPTEKİ PUZOLANLARIN BETONUN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Erkan YILDIZ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mart 2006**

ÖZET

Bu çalışmada, puzolanik katkı malzemesi olarak diyatomit, yüksek fırın cürufu ve uçucu külün beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla; puzolanlar, çimento yerine ağırlıkça % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında ikame edilerek beton karışımları üretilmiştir. Üretilen betonlar ile 10x10x10 cm boyutlarında küp numuneler hazırlanmış ve bu numuneler, laboratuarda 28, 90 ve 180 gün kür edildikten sonra basınç ve aşınma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Üretilen betonlar, hem birbirleri ile hem de PÇ 42,5 kullanılan kontrol betonu ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre üretilen betonlar arasında en yüksek basınç ve aşınma dayanımları % 10 Çankırı diyatomit ikameli betonda (% 10 ÇDİB) elde edilmiştir.

Bilim Kodu :714
Anahtar Kelimeler :Beton, puzolan, diyatomit, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, mekanik özellikler.
Sayfa Adedi :79
Tez Yöneticisi :Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

**EFFECT OF DIFFERENT TYPE OF POZZOLANS ON MECHANICAL
PROPERTIES OF CONCRETE**

(M.Sc. Thesis)

Erkan YILDIZ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

March 2006

ABSTRACT

In this study, the effect of diatomite, blast furnace slag and fly ash as pozzolanic additives on characteristics of concrete has been investigated. For this purpose, the concrete mixtures have been prepared by replacing these pozzolans in ratios of 5 %, 10 %, 15 % and 20 % by weight of cement. 10x10x10 cm cube specimens were produced and cured at 28, 90 and 180 days in laboratory. Then, the compressive strength and abrasion resistance tests have carried out on these specimens. Produced concretes were compared with each other as well as with Portland cement (PÇ 42.5) concrete. In accordance with the test results, the highest compressive strength and abrasion resistance was obtained with 10 % Çankırı diatomite replacement concrete (10 % CDIB).

Science Code :714

**Key Words : Concrete, pozzolan, diatomite, blast furnace slag, fly Ash,
mechanical properties**

Page Number : 79

Adviser : Assoc. Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli tecrübe ve önerileriyle beni yönlendiren, her konuda yardım ve katkılarda bulunan hocam Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ'a, tecrübe ve yardımlarını esirgemeyen sayın Yar. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e, malzeme temininde yardımcı olan Şerbetçi, Yibitaş ve İstaş Hazır Beton fabrikası laboratuvarı şeflerine, çimento deneylerinin yapılmasında yardımcı olan Ankara Set Çimento A.Ş.'ye ve Laboratuvar şefi sayın Sıral ÖZEL, laboratuvar personelleri sayın, Servet KÖRİCEKLİ, Ahmet ÇAĞATAY ve Şeref BOZKURT, beton numunelerin saklanması yardımcı olan Pelin Beton Laboratuvarı müdürü Gürcan MUTLU, laboratuvar çalışanlarından Mehmet AKKAN, Osman DOĞAN ve İsmet YILDIZ'a, çalışmalarımındaki katkılarından dolayı değerli arkadaşım Mehmet BULGU'ya, DSİ Teknik Araştırma ve Kontrol Dairesi Beton Laboratuvarı şefi sayın Fatih KOCABEYLER ve değerli personele, DHL Beton Laboratuvarı Metin ÇEMİL'e, tezin yazım aşamasında yardımlarını esirgemeyen Özlem ÜÇÜNCÜTEKGÜL'e, sevgili Anne ve Babama, sevgili kardeşlerime ve çalışmalarımda katkıda bulunan herkese teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
<i>TEŞEKKÜR</i>	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 Beton ve Bileşenleri	3
2.1.1. Agregalar	3
2.1.2. Çimento	4
2.1.2. Su	7
2.2. Puzolanlar	8
2.2.1. Puzolanların sınıflandırılması	9
2.2.2. Doğal puzolanlar	9
2.2.3. Volkanik orjinli puzolanlar	11
2.3. Diyatomit	12
2.3.1. Diyatomitlerin oluşumu	13
2.3.2. Diyatomitin tarihçesi	13
2.3.3. Diyatomitin kullanım alanları	14

2.3.4. Diyatomitlerin fiziksel özellikleri	15
	Sayfa
2.3.5. Diyatomitin kimyasal özellikleri	16
2.3.6. Diyatomit ile ilgili yapılan önceki çalışmalar	16
2.4. Yüksek Fırın Cürufu.....	19
2.4.1. Yüksek fırın cürufunun yapısı.....	21
2.4.2. Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu	22
2.4.3. Cürufu çimentolar	24
2.4.4. Cürufu çimentolarla üretilen betonlar	26
2.4.5. Cüruf standardı	28
2.4.6. Yüksek fırın cüruflarının kullanım alanları.....	29
2.4.7. Yüksek fırın cürufu ile ilgili yapılan önceki çalışmalar	30
2.5. Uçucu Kül.....	31
2.5.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri.....	33
2.5.2. Uçucu küllerin özellikleri	35
2.5.3. Uçucu kül ile ilgili yapılan önceki çalışmalar	37
3. MATERYAL VE METOT	40
3.1 Materya.....	40
3.1.1 Agrega	40
3.1.2 Çimento	40
3.1.3 Diyatomit.....	42
3.1.4 Yüksek fırın cürufu	42
3.1.5 Uçucu kül	43
3.1.6 Karışım suyu.....	43
3.2 Materya.....	43

	Sayfa
3.2.1 Beton.karışım hesabı	43
3.2.2 Deney programı	44
3.2.3 Numune boyutları, betonun dökümü ve bakımı	45
3.2.4 Çimento deneyleri	45
3.2.5 Taze beton deneyleri	51
3.2.6 Serleşmiş beton deneyleri.....	54
4. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	57
4.1 Puzolanların Çimento Özelliklerine Etkisi.....	57
4.1.1 Puzolanların standart kıvama etkisi.....	57
4.1.2 Puzolanların priz süresine etkileri	58
4.1.3 Puzolanların hacim genişmesinin etkisi	59
4.2 Puzolanların Taze Beton Özelliklerine Etkisi	60
4.3 Puzolanların Basınç Dayanımına Etkisi	63
4.4 Puzolanların Aşınma Dayanımına Etkisi	64
4.4.1 Puzolanların 28 günlük aşınma dayanımına etkisi	64
4.4.2 Puzolanların 90 günlük aşınma dayanımına etkisi	67
4.4.3 Puzolanların 180 günlük aşınma dayanımına etkisi	68
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	70
5.1 Sonuçlar.....	70
5.2 Öneriler.....	71
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çimento dayanım sınıfları	6
Çizelge 2.2. Suların zararlılık dereceleri için sınır değerleri	7
Çizelge 2.3. Diyatomitin ticari bakımdan kimyasal bileşim sınırları	16
Çizelge 2.4. YFC'ların kimyasal analiz sonuçları (%)	23
Çizelge 2.5. Kömüre dayalı termik santrallerde kazan ve kömürden elde edilen kül miktarı	33
Çizelge 2.6. UK Tipik Kimyasal Kompozisyonlarının YFC, Kil ve PÇ ile Karşılaştırması	36
Çizelge 3.1. Kırma taş agregaların teknik özellikleri.....	40
Çizelge 3.2. PÇ 42,5 çimentosu ile puzolanların özellikleri	41
Çizelge 3.3. 1 m ³ karışıma giren malzeme miktarı	44
Çizelge 3.4. Deney Programı	44
Çizelge 4.1. Çimentolarının standart kıvam suyu ihtiyaçları (%).....	58
Çizelge 4.2. PÇ 42,5 ve puzolan ikameli çimentoların priz süreleri ve hacim genleşmesi değerleri	59
Çizelge 4.3. KB ve puzolan ikameli betonların fiziksel özellikleri	60
Çizelge 4.4. Üretilen betonları basınç dayanımları	63
Çizelge 4.5. Puzolanların 28. gün aşınma dayanım sonuçları.....	66
Çizelge 4.6. Puzolanların 90. gün aşınma dayanım sonuçları.....	67
Çizelge 4.7. Puzolanların 180. gün aşınma dayanım sonuçları.....	69

1.GİRİŞ

Türkiye’de ve Dünyada inşaat sektörünün en önemli malzemelerinden biri olan çimentoların, ham madde kaynak araştırmaları, çimentoların özelliklerini iyileştirme, daha ekonomik ve kaliteli hale getirmek amacıyla yapılan çalışmalar devam etmektedir. İnşaat sektöründeki gelişmeye paralel olarak çimento tüketimi de artmaktadır. Çimento üreticileri açısından, üretimin minimum maliyette yapılması ve talebin karşılanması, yapımcı ve kontrollük açısından ise daha ucuz, güvenli ve dayanımı yüksek malzemelerin kullanılması istenmektedir (1).

Günlük yaşamı tümüyle hammaddelere bağlı olan insanoğlu halen yılda üretim değeri 800 milyar Euro olan 32 ton hammadde üretilip tüketmektedir. En basit bir bilgisayarda 30 değişik metal, bir arabada ise 176 kg alüminyum kullanılmaktadır. 78 yıllık ömür beklentisi olan bir Alman yaşamı boyunca 953 ton hammadde tüketmekte, bunun 763 tonu ülke kaynaklarından sağlanmaktadır. Kişi başına 307 ton kum-çakıl, 116 ton petrol, 72 ton kireçtaşı-dolomit, 40 ton çelik, 29 ton çimento, 12 ton tuz, 4 ton kaolen ve 1 ton bakır tüketmektedir (2).

Çimento üretiminde kullanılan katkı malzemelerinin çoğunluğunu, puzolanik özelliğe sahip olanlar meydana getirmektedir. Silisli veya silisli ve alüminli yapıda olup kendi başlarına bağlayıcı özelliğe sahip olmayan, ancak ince öğütülmüş halde, normal sıcaklıkta ve rutubetli ortamlarda sönmüş kireçle reaksiyona girip bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler oluşturan malzemeler puzolanlar veya puzolanik malzemeler olarak isimlendirilmektedir (3).

Puzolanlar, doğal ve yapay olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Doğal puzolanlar, volkanik kül, ponza taşı, tras gibi volkanik orijinli ve diatomit gibi silisli kavrıların çökmesi sonucunda oluşan malzemelerdir. Yapay puzolanlar ise genellikle bir ısıtım işlemi neticesinde elde edilen silis dumanı, uçucu kül (UK), yüksek fırın curufu

(YFC) v.b. gibi atık malzemeler veya özellikle ısıtılma tabii tutulan kil, şely v.b. malzemelerdir (4). Doğal puzolanlar, ekseriye genç volkanik kayalardır. Yapay puzolanlar, kömürlü güç santralleri tarafından üretilen kül içermektedir (5).

Bu malzemelerin çoğunu, puzolanik özelliğe sahip olanlar meydana getirmektedir. Puzolanlar, su ile karıştırıldıklarında çimento klinkeri gibi sertleşmeyip, sönmüş kireç ve su ile beraber çimento özelliği gösteren suda çözünmeyen bileşikler oluşturan malzemelerdir. Çimento ile puzolanın sulu karışımında ortamda bulunan kireç çimentodan gelmektedir (5).

Bilindiği gibi çimento, beton üretiminde kullanılan en pahalı bileşen konumundadır. Çimentoların teknik özellikleri ve miktarı, betonun performansına ve ekonomisine etki etmektedir. Bu yüzden puzolanik malzemeler, betonun maliyetini azaltmak ve çeşitli özelliklerini iyileştirmek amacıyla ya doğrudan katkı olarak ya da çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere betona katılmaktadır (4).

Türkiye, puzolanik malzemeler bakımından, oldukça önemli kaynaklara sahiptir. Ancak mevcut potansiyel yeterince kullanılmamaktadır. Puzolanların en yaygın kullanımı, çimento endüstrisinde gerçekleşmektedir. Gerek Portland puzolanlı ve kompoze gerekse de puzolanik ve kompoze çimento üretiminde bir doğal puzolan olan tras, Portland uçucu küllü ve kompoze çimento ile yine puzolanik ve kompoze çimento üretiminde yapay bir puzolan olan UK kullanılmaktadır. Diğer doğal ve yapay puzolan tüketimi yok denecek kadar azdır (4,6,7).

İnşaat sektörümüzde maalesef ekonomiklik dayanıklılıktan önce gelmektedir. Devletimiz bile –bazı projeler hariç- bu anlayıştadır. Marmara depremi ve diğer depremlerde yıkılan ve ağır hasarlı olan yapılar bu anlayışa örnek olarak verilebilir. Apartman yapımında yap-satıcılık gibi bir sistem olduğu için müteahhit için maliyet ilk şart olarak geçerliliğini korumaktadır. Bu anlayıştan yola çıkarak, kaba inşaat maliyeti bina maliyetinin % 30-40'ı mertebelerinde olması ve kaba inşaat kısmında betonun önemli bir “gider” olmasından dolayı, beton bileşenlerinden çimentoya alternatif malzemeler araştırılmıştır. Tabii bu malzemelerin bir kısmı ‘ atık’, bir kısmının da ‘doğadan’ elde edilecek olması maliyeti önemli ölçüde düşürmesi

beklenmektedir. Bu çalışmada farklı tipteki puzolanların basınç ve aşınma dayanımlarına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Beton ve Bileşenleri

Agrega (kum-çakıl), çimento, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin karıştırılmasıyla elde edilen başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidrasyonu sonucu katılaşmış sertleşen kompozit yapı malzemesine beton denir (8).

2.1.1. Agregalar

Betonun ana iskeletini oluşturan, toplam hacmin yaklaşık % 60-80 oranlarında yer işgal eden mineral kökenli, taneli malzeme, agrega olarak isimlendirilir. Agregalar elde edilmesine göre doğal ve yapay agregalar olarak ikiye ayrılır. Agregalar; suyun etkisi altında yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentonun bileşenleri ile birlikte zararlı bileşikler meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidir (9).

İyi bir aderans için kırma taş agregası kullanılması, şekli bozuk tanelerin % 5'i geçmemesi, düşük s/ç oranlı karışımlarda bir miktar su emen agregası seçilmesi, kaba agreganın mekanik özelliklerinin yeterli düzeyde olması, ince agregalar için uygun aderaslar oluşturur. Diğer taraftan agreganın tane çapının (D_{mak}) büyük olması, genel olarak betonda iri tanelerin fazla bulunduğunu gösterir. Bu durum agregalar için gerekli su miktarının azalmasına neden olur. Tane çapı büyük olan agregalar kullanılarak üretilen betonların kompaktitesi büyük olur ve ayrıca bunlar az miktarda suya ihtiyaç gösterirler. Böylece bunlardan dolayı agreganın tane çapı büyük olan betonların mukavemetinde önemli bir artış sağlanabilir. Yalnız mukavemetin yüksek olmasını sağlamak için agreganın tane çapının artırılması yönünde fazla ilerlemek, bu karakteristiğin işlenebilirlik özelliğini azaltması bakımından elverişli değildir (9).

Agregalarda aranan en önemli özellikler şunlardır:

- ❖ Sert, dayanıklı ve boşluksuz olmaları,
- ❖ Zayıf taneler içermemeleri (deniz kabuğu, odun, kömür vb.)
- ❖ Basınca ve aşınmaya mukavemetli olmaları,
- ❖ Toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeleri,
- ❖ Yassı ve uzun taneler içermemeleri,
- ❖ Çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleridir.
- ❖ Agregada silt ve kil olmaması

Agregaların fiziksel özellikleri denildiğinde başlıca şu özellikler ön plana çıkar; birim ağırlık, özgül ağırlık, kompasite, boşluk oranı, agreganın su emme kapasitesi ve mevcut rutubet durumu, donma-çözülme ve diğer fiziksel etkilere karşı dayanıklılık (10).

Agregalarda aranılan en önemli özelliklerden biri, mekanik mukavemetlerinin bunların içinde özellikle basınç mukavemetinin yüksek olmasıdır. Betonda kullanılacak agreganın basınç dayanımının en az 600 kgf/cm² olması istenir. Yol ve hava meydanlarındaki beton, çarpma ve aşınma etkisi altındadır. Betonun bu etkilere dayanabilmesi için, yapımında kullanılan iri agreganın aşınmaya ve çarpmaya karşı yüksek mukavemete sahip olması gerekir (10).

2.1.2. Çimento

Çimento kelimesi, yontulmuş taş anlamındaki Latince (caementum) sözcüğünden türetilmiştir. Çimento, 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 (1).

Çimento üretimi, kompleks bir işlemdir ve büyük tesislere ihtiyaç göstermektedir. Çimentonun temel maddeleri, kireç taşı ve kildir. Kireç bir bazdır ve silis, alümin ve demiroksitle birleşme özelliği vardır. Kıl, saf olmayan alüminyum, kalsiyum ve demir silikattır. Çimento üretiminde gaye, bu maddeleri belirli oranlarda karıştırmak ve yüksek sıcaklıkta (1400-1500 °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) katılarak 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 (1,11).

Çimentonun üretimi sırasında asit ve bazik ögeler birbirleriyle birleşerek portland çimentolarının dört ana bileşenini oluştururlar. Bunlar;

2 CaO. SiO ₂	Dikalsiyum Silikat (C ₂ S)
3 CaO. SiO ₂	Trikalsiyum Silikat (C ₃ S)
3 CaO. Al ₂ O ₃	Trikalsiyum Alüminat (C ₃ A)
4 CaO.Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	Tetrakalsiyum Alümino-Ferit (C ₄ AF) (12).

Çimento çeşitleri

Genel olarak çimentolar, ana malzemelerine göre isim almaktadırlar. Çimentolardan istenilen düzeyde yararlanabilmek için kullanılacak yerlerin özelliğine göre çimento seçmek gerekir. Sülfatlı zeminle veya su ile temas eden inşaatlarda sülfata dayanıklı

çimento kullanılması, kütle betonlarda ise hidrasyon ısısı düşük çimento seçmek gerekir (10).

TS EN 197-1 “Çimento Bölüm 1:Genel Çimentolar-Bileşim, Özellik ve Uygunluk Kriterleri” (13) standardı kapsamında 27 farklı genel çimento beş ana tipte olmak üzere gruplandırılmıştır:

- ❖ CEM I Portland Çimentosu
- ❖ CEM II Portland-Kompoze Çimento
- ❖ CEM III Curuflu Çimento
- ❖ CEM IV Puzolanlı Çimento
- ❖ CEM V Kompoze Çimento (13).

Çimento dayanım sınıfları

Çimento dayanım sınıfları, 32.5, 32.5 R, 42.5, 42.5R, 52.5 ve 52.5R olmak üzere altıya ayrılmıştır. Bu sınıflandırmada, 28 günlük minimum basınç dayanımı değerinin yanında belirtilmiş olan “R” harfi, erken dayanım koşulu getirmektedir. Çizelge 2.1’de TS EN 197-1 “Çimento Bölüm 1:Genel Çimentolar-Bileşim, Özellik ve Uygunluk Kriterleri”(13) standardındaki dayanım sınıfları ve basınç dayanımı sınırları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çimento dayanım sınıfları (13)

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanım Sınırları (N/mm ²)		
	2 Gün	7 Gün	28 Gün
32.5	-	≥16	≥32.5, ≤52.5
32.5R	≥10	-	≥32.5, ≤52.5
42.5	≥10	-	≥42.5, ≤62.5
42.5R	≥20	-	≥42.5, ≤62.5
52.5	≥20	-	≥52.5

52.5R	≥30	-	≥52.5
-------	-----	---	-------

TS EN 197-1 “Çimento Bölüm 1:Genel Çimentolar-Bileşim, Özellik ve Uygunluk Kriterleri” (13) standardında 32.5 ve 42.5 dayanım sınıfı çimentolar için ilk priz süresi en az 60 dakika, 52.5 dayanım sınıfı çimentoların ise en az 45 dakika olarak belirlenmiştir.

2.1.3. Su

Kural olarak içilebilen bütün sular, beton üretiminde endişe duyulmadan kullanılabilirler. Ancak her zaman bu özellikte su bulmak mümkün olmayabilir. Beton karma suyu asidik olmamalıdır. Yani, pH derecesi 7 ve 7’nin üzerinde olmamalıdır. Çizelge 2.2’de belirtilen madde ve özelliklerden biri zararlı etki düzeyine ulaşıyor ise, suyun zararlı etkinlik derecesinin tayininde bu düzeye ait değer esas alınır. İncelenen özelliklerden iki veya daha fazlasının söz konusu olması halinde, aralarında en yüksek zararlı etkinlik derecesine karşılık gelen değer esas alınarak zararlı etkinlik derecesi tayin edilir (14,15).

Çizelge 2.2. Suların zararlılık dereceleri için sınır değerleri

Sıra No	İncelenen Özellikler	Zararlı Etkinlik Derecesi		
		Zayıf	Kuvvetli	Çok Kuvvetli
1	PH Değeri	6.5-5.5	5.5-4.5	4.5’den küçük
2	Kireç Çözücü (CO ₂ mg/L) (Heyer Mermer Deneyi İle)	15-30	30-60	60’den büyük
3	Amonyum (NH ₄ ⁺) mg/L	15-30	30-60	60’den büyük
4	Magnezyum (Mg ²⁺) mg/L	100-300	300-1500	1500’den büyük
5	Sülfat (SO ₄ ⁺) mg/L	200-600	600-3000	3000’den büyük

Beton üretiminde kullanılan karma suyu;

- ❖ Bağlayıcı maddenin hidratasyonunu sağlar,
- ❖ İnce ve iri agrega tanelerini ıslatır,

- ❖ Betonun işlenebilme özelliğinin istenilen düzeyde olmasına yardım eder.

Belirli miktar da çimento, kum ve iri agrega kullanarak beton üretimi istendiğinde en uygun gelen bir optimum su miktarı vardır ki, bu miktar suyun kullanılmasıyla mukavemeti maksimum olan beton elde edilir (11).

Beton karışımında, çimento ağırlığının % 36-42'si arasında karma suyu kullanılması çimentonun hidratasyonu için yeterlidir. Bundan fazla su, betonun işlenebilme özelliği için gereklidir. Karışım suyu miktarı, çimentonun inceliği ve agregadaki çok ince malzeme ile doğru orantılıdır. Kimyasal olarak bağlanamayan su, betonda büzölmelere ve istenmeyen boşluklara neden olur (16).

2.2.Puzolanlar

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcı özelliğine sahip olmayan, ancak ince öğütölmüş halde normal sıcaklıkta ve nemli ortamlarda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşikler oluşturan, silisli veya silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (3,4,17,18).

Puzolanlar, doğal olarak meydana gelen malzemeleri (başlıca volkanik orijinli malzemeler) ve yapay malzemeler olan kül, YFC vb. malzemeleri kapsamaktadır (17).

Puzolan terimi, genel bir ifade olmakla beraber puzolanlar, bulundukları öökelere göre özel adlar almıştır. Mesela, Almanya'da, "Tras" adı ile anılmış, Yunanistan'da ise Santorin toprağı olarak anılmıştır. Ölkemizde bu tip volkanik tuf karakterli puzolanlara tras denilmektedir. Fakat son yıllarda traslı ve katkılı çimentolara verilen önemin artmasıyla Puzolan ismi de gerçek anlamına kavuşmuştur. Ölkemizde İç Anadolu, İç Ege, Marmara, Karadeniz, Akdeniz Bölgelerinde bol miktarda tras kaynakları bulunmaktadır. Türkiye jeoloji haritasında 155 000 km² alanı kaplayan volkanik kayaç oluşumlarının varlığı görölmektedir ki bu alan, Türkiye yüz

ölçümünün hemen hemen 1/5'i kadardır. Bu değerlere göre ülkemiz, tras hammaddesi bakımından oldukça zengindir. Diğer taraftan, 1985-1990 yılları arasında üretilen çimentoların % 14,6'lık kısmı traslı çimento iken, bu oran 1992-1994 yılları için % 36,31'e çıkmıştır (1).

19. yüzyılın sonlarında Portland Çimentosunun (PÇ) keşfedilmesiyle puzolanik çimentonun pratik kullanımında azalma görülmüştür. Ülkemizde, 1950 yılından sonra PÇ ile puzolanik madde kombinasyonlarının kullanılması ile beton ve harçların bağlayıcılık özelliklerinde etkili yararlar görülmüş ve puzolanlar, çimento malzemesi olarak kabul edilmiştir (1).

2.2.1. 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 (19) :

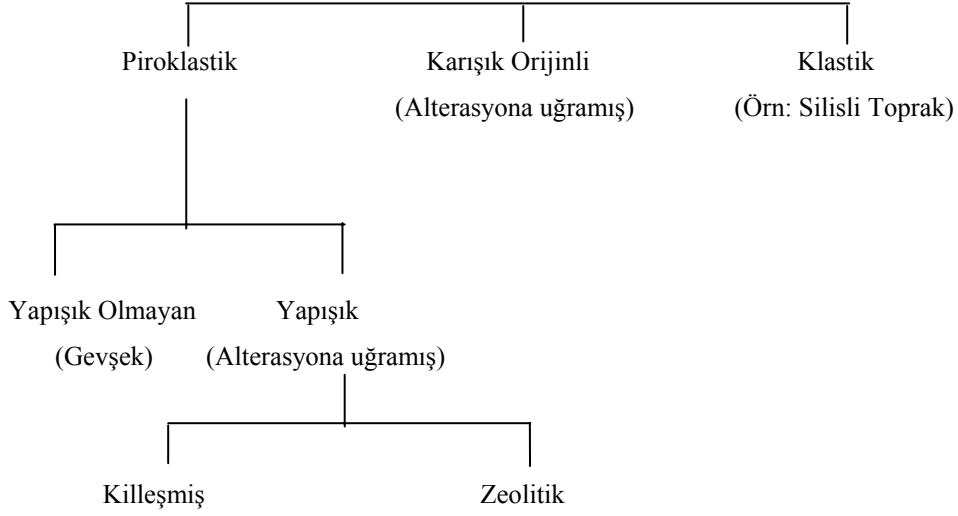
- ❖ Aktif tertip maddeleri: Az ya da çok değişmiş cam fazları, opal, silisli toprak, zeolitler.
- ❖ Atıl bileşenler: Zeolitlerden farklılık gösteren kristal fazları (augit, piroksen ve saf çini).
- ❖ Zararlı (istenmeyen) bileşenler: Organik maddeler, kalay ve karbon maddeleri.

2.2.2. Doğal puzolanlar

Doğal puzolanlar, başlangıcından sonra az veya çok değişikliğe uğramış volkanik kökenli doğal tortul kayalardan oluşurlar. Doğal puzolanlar; Piroklastik kayalar (Volkan tüfleri, diatomit, tras, killi maddeler ve zeolitli maddeler vb.), değişik orijinli maddeler (beyaz İtalyan toprakları) ve kırıntı taşlar olarak sınıflandırılmaktadır. Bu tip puzolanik maddeler, öğütülerek kullanıldığı gibi bazıları

doğal da olarak kullanılmaktadır (20). Betonda puzolanların kullanılabilmesi için, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı % 70'den büyük veya eşit olmalıdır. Puzolanların içindeki serbest kireç miktarının % 4'den fazla olmaması istenir. Şekil 2.1'de doğal puzolanların sınıflandırılması görülmektedir (19).

Doğal Puzolanlar



Şekil 2.1. Doğal puzolanlar (19)

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 (7):

- ❖ Maddelerin hızlı soğumasına bağlı olarak fışkırma 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, 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. Fıskıran madde, katılaşma sürecinde camsı bir yapı kazanmaya başlar. Fakat, sadece camsı fazdan oluşan Piroklastik kaya yoktur (7).

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) (7).

2.2.3. 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 (21).

Volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar ve volkanik küller, en çok kullanılan volkanik orijinli puzolanlardır (21).

2.3. Diyatomit

Diyatomit su yosunları sınıfından tek hücreli, mikroskopik yosunların fosilleşmiş silisli tanelerinden meydana gelmiş bir çökeldir (22,23). Başka bir kaynakta, günümüzden 5 ila 20 milyon yıl önce yani miyosen çağında, durgun sularda yaşamış olan tek hücreli, gözle görülmeyecek kadar küçük canlıların anorganik iskeletleri şeklinde tarif edilmektedir. Ayrıca volkanik faaliyet bölgelerine yakın, tatlı ve tuzlu göl veya deniz sularında yaşayan tek hücreli, mikroskobik, silis yapılı, esmer bir yosun çeşidi olan diyatomelerin ölmesi ile silisli kabukların bir araya toplanması sonucunda meydana gelen bir mineral olarak da tanımlanmaktadır (24).

Diyatomit; diatomeli toprak, diatomeli silis, kizelgur deyimleri ile eşanlamlıdır. Diyatomit aşağıdaki isimlerle de anılmaktadır (25):

1. Tripolit : Bu isim Trablusgarb'daki rezervlerden dolayı kullanılmaktadır.
2. Moller : Kuzey Danimarka'da Mors ve Fur adalarından çıkan düşük kaliteli ve killi diyatomite verilen isimdir.
3. Fosil unu, Bergmehl (dağ unu), Kieselmehl (silis kumunun unu): Bu kelimeler, Orta Avrupa'da 17. yy ekmeğe öğütülmüş diyatomitin ilave edildiği kıtlık yıllarından kalmıştır.
4. İnfüzuvar Toprağı : Diyatomite daha önce verilen bu terim ile 'radyolarya toprağı' teriminin kullanılması hatalıdır. Çünkü infusoria ve radiolaria tek hücreli

hayvanlar oldukları halde diyatometler, hayvanlar ve bitkiler arasında yer alan protistler alemine aittirler. Keza bazı diyatomit zuhurlarına ‘desmid toprağı’ denmesi de hatalıdır. ‘Desmidiaceae ‘bir yeşil alg çeşidi olup hücre cidarlarında eser miktarda SiO₂ ihtiva eder.

5. Polierschifer (parlatma toprağı), Moskof Toprağı : Bu terimler diyatomitin uzun süre cila maddesi olarak kullanılmasından dolayı geçerli olmuştur.

6. Bann Kili : Kuzey İrlanda’daki Bann nehri boyunca uzanan ve hafif tuğla imalinde kullanılan killi diyatomite bu isim verilmiş ve diğer diyatomit türleri için de kullanılmıştır.

7. Beyaz Turba: İskoçya’da Aberdeenshire-Ballates yakınındaki diyatomitlerin turbalar altında bulunmasından dolayı bir süre hem öz rezervler, hem de diğer diyatomitler için kullanılmıştır (26).

2.3.1. Diyatomitlerin oluşumu

Diyatomit mineralini oluşturan diyatomlar, bugün de hayatlarını sürdürmektedir. Ancak sayıları geçmişe göre çok azdır. Su içindeki erimiş su miktarı, diyatomelerin büyüme ve üreme hızını etkiler. Nem ve ışıkla da beslenen diyatomlar, denizlerde genellikle koloniler halinde, göl-nehir yataklarında, ıslak kayalarda bireyler halinde gelişmişlerdir (23). İkiye ayrılabilen bir hücre yapısına sahip oldukları için diatome denen bu varlıklara çubuk şeklinde olan türlerinden dolayı botanikte Bacilariophyta adı verilmiştir (25).

2.3.2. Diyatomitin tarihçesi

Diyatomitlerin farklı amaçlarda kullanıldığı görülmektedir. Diyatomit tuğlası, İstanbul’da M.S. 530’lu yıllarda inşa edilen Ayasofya’nın kubbesinde hafifliği sebebiyle kullanılmıştır (26).

Diyatomit, endüstride ilk kez 1867 yılında Alferd Nobel tarafından 1/3 oranında nitrogliserin-diyatomit karışımı ile dinamitin taşınabilen patlayıcı madde üretilmesinde kullanılmıştır (26).

Diyatomit, 19. yüzyılın ikinci yarısına doğru izolasyon malzemesi olarak, daha sonra şeker kamışı süzme işleminde kullanılmıştır. A.B.D.'de önemli yatakların bulunmasıyla üretim ve teknolojiye önemli ilerlemeler sağlanmıştır (23).

Türkiye'de, diyatomit yatakları M.T.A. Genel Müdürlüğü tarafından tespit edilmeden önce civar köylerde badana ve tebeşir olarak kullanılmıştır (24).

Türkiye'de; Afyon, Ankara, Çanakkale, Çankırı, Denizli, Kayseri, Kütahya ve Uşak'ta olmak üzere 8 ilde diyatomit yataklarının bulunduğu görülmektedir (24). Bilinen diyatomit yataklarının içerisinde Kayseri-Hırka çevresinde 60 milyon m³ kaliteli, 40 milyon m³ killi diyatomit olduğu tahmin edilmektedir ve yurdumuzun en büyük diyatomit yatağıdır (27).

2.3.3. Diyatomitin kullanım alanları

Farklı sanayi dallarında esas ve yardımcı hammadde olarak kullanılan diyatomit, en çok filtrasyon sanayiinde kullanılmaktadır. Başlıca kullanım alanları:

- ❖ 1-Süzme –Filtrasyon maddesi: Şeker, meyve suyu, bira, yağ, şarap, ilaç sanayi, suların berraklaştırılması, jet benzinin süzülmesi v.b
- ❖ 2-Dolgu malzemesi: Tarım ilaçları, boya, lastik, kağıt, muşamba
- ❖ 3-Yalıtım malzemesi
- ❖ 4-Yapı malzemesi
- ❖ 5-Refrakter malzeme
- ❖ 6-Çimento puzolanik malzemesi
- ❖ 7-Katalizör taşıyıcısı
- ❖ 8-Temizlik maddeleri, otomobil lastiği, cila, sır, cam gibi çeşitli alanlardadır (19,23,24,28,29).

2.3.4. Diyatomitlerin fiziksel özellikleri

Diyatomit, tebeşir görünümünde olup kavkı (tane) büyüklüğü 2-200 µm arasında değişir ve amorf silis (opal) yapıdadır ($\text{SiO}_2\text{XnH}_2\text{O}$) (13,21). Diyatomitler hücre çeperleri, biri içinde kalan, diğeri onun üzerine geçen iki parçadan ibaret bir kutuya benzer. Bu iki parça; mekanik olarak kolaylıkla birbirinden ayrılabilir. Büyük olan üst parçaya epiteka, küçük olana ise hipoteka denir. Diyatomitlerin yandan görünüşleri genellikle dikdörtgendir. Üstten görünüşleri ise diyatomitin cinsine göre büyük değişiklik gösterir (27).

Diyatomit düşük özgül ağırlığa ve yüksek gözenekliliğe sahiptir. Kuru halde özgül ağırlığı 0,15-0,40 gr/cm³ arasındadır. Diyatomitin Mohs ölçeğine göre tanecik olarak sertliği, 4,5-6 arasında, kayaç olarak sertliği ise 1,5 dolayında olup porozitesi % 80-85 arasındadır. Yüksek su emme özelliğine sahip olduğundan ağırlığının 3 katına kadar su absorbe edebilir (23, 26).

Diyatomit, renk olarak beyaz, açık sarı, bej, gri olabileceği gibi organik malzeme oranı yüksek olanlar yeşil, kahverengi hatta siyaha yakın olabilir (24, 26). Diyatomitin basınç dayanımı 3-18 kgf/cm² arasında değişmektedir (24).

Diyatomitlerin dairesel veya elipsvari olanlarının en küçüklerinde çap 2,5 µm, en büyük de 2 mm'dir. Çubuk şeklinde olanlarda ise boy nadiren 2 mm'yi geçer. Diyatomitlerin ortalama çap ve uzunlukları, 5-100 µm arasındadır (25).

Diyatomit kavkısı üzerindeki deliklerin çapı, 0,01 µm'dan küçük olabilir. Genellikle delik boyutları 0,037 - 0,52 µm olup ortalama 0,25 µm civarındadır (25). Bir diyatome uygun şartlar altında bir ayda 1 milyar yeni diyatome meydana getirebilir (27).

2.3.5. Diyatomitin kimyasal özellikleri

Diyatomit, kimyasal bileşiminde, genellikle % 70-90 arasında SiO_2 bulunur (26,31). Diyatomit, bir çok kimyasal maddeye karşı tepkisizdir. Erime noktası 1000-1590 °C arasında değişir. pH değeri, yataktan alındığında 5-9 arasındadır. Diyatomitin bileşiminde bulunan demirin ayrılması için, % 2-8 arasında eriyebilen bir alkali tuzuna katılarak, döner fırında 600-1000 °C sıcaklıkta pişirmek suretiyle kalsinasyon işleminden geçirilir. Çizelge 2.3’de diyatomitin ticari bakımdan kimyasal bileşim sınırları verilmiştir (23).

Çizelge 2.3. Diyatomitin ticari bakımdan kimyasal bileşim sınırları (23)

Oksit	Sınır Değeri (%)
SiO_2	En az 85
Al_2O_3	En çok 5
Fe_2O_3	En çok 1,5
CaO	En çok 1
MgO	En çok 0,5
Alkali Oksitler	En çok 1
Kızdırma Kaybı	En çok 6

2.3.6. Diyatomit ile ilgili yapılan önceki çalışmalar

Çeşitli yayınlarda % 3 diyatomit katkısı ile betonun basınç dayanımının % 20, çekme dayanımının % 10 arttığından bahsedilmekte fakat kaynak verilmemektedir (28).

Deneysel bir çalışmada, Portland klinkeri ve diyatomit karışımından ibaret çimento numuneleri oluşturulmuştur. Farklı oranlarda diyatomit ihtiva eden bu çimentoların fiziksel ve kimyasal deneyler yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları incelendiğinde % 10 diyatomit katkı oranının dayanımları yaklaşık % 30 artırdığı görülmüştür. % 20 ve daha yüksek katkı oranlarının ise çimentonun su gereksiniminin artması nedeniyle dayanım düşmesine sebep olduğu görülmüştür (28).

Deney sonuçlarına göre katkısız çimentonun 30 dakikada öğütülerek eriştiği 345 kgf/cm² dayanımın üzerindeki 372 kgf/cm²'lik dayanıma %10 diyatomit katkılı çimento 20 dakikalık öğütme sonucunda erişilebilmektedir. O halde öğütme süresi 30 dakikadan 20 dakikaya düştüğüne göre değirmende yaklaşık %33'lük bir elektrik enerjisi tasarrufu sağlayabileceği görülmüştür. 30 dakikada 40 ton çimento öğütebilen bir değirmende %10 diyatomit katkısı ile 40 ton çimentoyu 20 dakikada öğütecektir. Dolayısıyla 1 saatte 80 ton yerine 120 ton öğütecektir. Böylece bu hesap sonucu görülmektedir ki üretim 1,5 katına çıkıyor ve değirmende üretim artışı %50 olmaktadır (28).

Diyatomit, ponza taşı (bims), tuf vb gibi betonda kullanılan doğal hafif agregalar arasında yer almaktadır. Diyatomit TS 1114 EN 13055-1 "Hafif Agregalar-Bölüm 1: Beton, Harç ve Şerbette Kullanım için" (32), ASTM C 330 "Lightweight Aggregates for Structural Concrete" (33), ASTM C 331, "Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Unites" (34) ve ASTM C 332, "Lightweight Aggregates for Insulating Concrete" (35)'de doğal hafif agregalar grubunda gösterilmektedir.

Bilindiği gibi diyatomit, betonda kullanılan hafif agregalar arasında yer almaktadır. Diyatomit minerali betonda agrega olarak kullanıldığında, kendi adını taşıyan diyatomit betonu elde edilmektedir (36).

Porozitesi % 77 olan bir diyatomitin çimento pastası ile betonun donma-çözülme dayanıklılığını önemli oranda iyileştirdiği deneysel çalışmalar sonucunda görülmüştür (26).

Diyatomit, ağırlıkça % 10, % 20 ve % 40 klinkerle birlikte öğütülerek diyatomit katkılı çimentolar elde edilmiştir. Bu çimentolar fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri bakımından hem birbiriyle hem de Portland çimentolarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak diyatomit katkılı çimentoların TS EN 197-1 "Çimento Bölüm 1:Genel Çimentolar-Bileşim, Özellik ve Uygunluk Kriterleri" (13)

uygun olduğu tespit edilmiştir. Netice itibarı ile diyatomitlerin imento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir (18).

TSE tarafından doğrudan diyatomit ile ilgili olarak çıkarılan dört standart bulunmaktadır. Bunlar; TS 9773 “Diyatomit – Isı Yalıtımında Kullanılan”(37), TS 11439 “Diyatomit-Aşındırıcı Olarak Kullanılan”(38), TS EN ISO 3262-22 “Boyalar İçin Dolgu Maddeleri-zellikler ve Deney Yöntemleri-Bölüm 22:Erişli Kalsine Diyatomit (Kizelgur)” (39) ve TS 11930 “Diyatomit-Dolgu Maddesi Olarak Kullanılan” (40), diyatomitin kullanım alanları ile ilgilidir.

Diyatomit, tuğla ve toz halde iyi bir iletkenliğe sahiptir (31, 41). Erime noktası yüksek olduğundan yüksek sıcaklığa sahip fırınların dış kaplamalarında ısı kaybını önlemek için kullanılmaktadır (24, 26). Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda, yüksek sıcaklığa sahip bir fırın ile bir kazanın ısı yalıtımının diyatomit tuğlası kullanılarak yapıldığı görülmüştür (26).

Ankara Kizelgur Fabrikası atığı diyatomitin imento üretiminde puzolan olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deneylerde kontrol imentosu olarak P 42,5 ve PK B 32,5 kullanılmıştır. P klinkerine atık diyatomit ağırlıkça % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 25 oranlarında katılarak birlikte öğütülmüştür. Numuneler 7, 28 ve 90 gün yaşlarında basınç ve eğilme deneylerine tabi tutulmuştur. Atık diyatomit katkılı çimentolar içinde en yüksek dayanımı % 10’da sağlanmıştır. Sonuç olarak atık diyatomitlerin % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranında katkılı imento üretiminde kullanılabileceği tespit edilmiştir (26).

Diyatomit, imento ağırlığının % 10, % 20 ve % 30’u kadar betona ilave edilmiştir. Yine diyatomitin imento ağırlığının % 10 ve % 20’si ile yer değişimi yapılmıştır. Diyatomit gözenekli yapısından dolayı imento için gerekli suyu absorbe ettiği için dayanım düşmesine sebep olmuştur. Diyatomitin imento ile yer değiştirmesi, betonun basınç dayanımında % 10-% 18 arasında azalmaya sebep olmuştur. Çekme dayanımlarında ise % 2-% 5 oranları arasında artışlar gözlenmiştir. Diyatomitin

betona direk olarak ilavesinde ise basınç dayanımı % 4-% 22 arasında, çekme dayanımları ise % 2 ile % 8 arasında azalmıştır (27).

2.4. Yüksek Fırın Cürufu

Demir cevheri, doğada, esas olarak içerdikleri demir oksit bileşenlerinin yanısıra silis, alümin, kükürt, fosfor, mangan gibi bazı yabancı maddelerle bir arada bulunmaktadır (42).

Cevher içerisindeki demiroksitten demir elde edebilmek için bu tür hammaddeler yüksek fırın adı verilen fırınlarda kok kömürü (karbon) ve arıtma işleminde yardımcı madde olarak kullanılan kalker taşı ile birlikte yüksek sıcaklığa tabii tutulurlar; redükleme sonucunda, demiroksit'teki oksijen kok kömürünün karbonuyla birleşerek karbonmonoksit ve karbondioksit olarak cevheri terk ederken geride, eriyik durumunda, demir ile birlikte kireç, kok kömürünün külü, silis, alümin ve diğer yabancı maddelerden oluşan ve “cüruf” adı verilen malzeme topluluğunu bırakır. Eriyiğin üst kısmında yer alan cüruf buradan yan ürün olarak dışarı çıkartılarak geride sadece demirin kalması sağlanır. Yüksek Fırın Cürufu (YFC), bağlayıcı özelliğe sahip olduğunun belirlenmesiyle birlikte dünyada 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren bu malzemeyi içeren bağlayıcıların ticari olarak üretimine başlanmıştır. YFC'nun gerek PÇ hammaddesi gerekse mineral katkı maddesi olarak kullanılması, sırasıyla 1883 ve 1892 yıllarına rastlamaktadır (43).

1862 yılında Langens'in YFC'lerin bağlayıcı özelliklere sahip olduğunun gözlenmesinin ardından 1865 yılında ilk kez YFC-kireç bağlayıcıları ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. YFC'nin çimento hammaddesi olarak kullanımı ilk kez 1883 yılındadır. PÇ klinkeri, YFC ile öğütülerek Portland Yüksek Fırın Cüruf Çimentosunun (PYFCC) üretimi de 1892 yılında Almanya'da başlamıştır (44).

Cüruflar, genelde metal filizlerinin fırınlarda arıtılması işleminin bir yan ürünü olarak ortaya çıkarlar. Yüksek fırın, çelik fırını ve demirsiz metal fırın cüruflarının çeşitli uygulamalarda kullanılarak değerlendirilmesi depo sorununa çözüm olarak

evre kirlenmesini de önlemektedir. Cüruflardan en yaygın ve bol bulunan YFC'nin kullanım alanları ve amaçları, öncelikle kimyasal bileşim, soğutma hızı ve soğutma suyu saflığına bağlı olarak belirlenir. Diğer taraftan, muhtemel ve mevcut kullanım alanları da cüruf üretim ve işleme araç ve yöntemlerini biimlendirebilmektedir(45).

Cüruflar çeşitli metalürji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ana ürün tipine göre ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklı özellikler gösterir (43).

Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen YFC, yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde yer alır. Demir filizi gangı, kok ve kireçtaşının yanma sonrası artıkları YFC'nu meydana getirirler. YFC'nun oluşum sıcaklığı 1400-1600 ^oC'dir (43).

Fırın cürufları, demir, bakır, alüminyum, krom ve nikel elde edilen fırınlarda metal filizinin indirgenmesi ve istenmeyen safsızlıkları da alıp ergiyerek akıcı hale geçer, yoğunluğu erimiş metalden az olup istenen alaşım elemanlarını da içeren ergimiş metalden ayrılabilen, kireç, silis, demir oksit alümin, magnezi içeren bazen fosfatlı bir karışımdır (45).

YFC, fırından erimiş halde çıktıktan sonra havada yavaş soğutulduğunda atıl malzeme olarak, su ile yeterince hızlı soğutulduğunda ise gizli hidrolik bağlayıcı özelliği ortaya çıkararak imento klinkerinin bir bölümü yerine kullanılabilir (45).

YFC, yavaş soğutulduğunda kristal bir yapıya sahip olur. Bu haliyle, bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve beton agregası olarak kullanılabilir. Öte yandan, hızlı soğutma uygulaması sonucunda ise camsı yapıda cüruf elde edilir. Bu tür cüruflar, granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) olarak adlandırılırlar. GYFC bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir (43).

Elde edilen cüruf miktarı, cevherin demir oranına, fırının verimlilik oranına ve büyüklüğüne bağlı olarak, genellikle 1 ton başına 0,3-1 ton arasında değişmektedir (46). Türkiye’de demir-çelik üretimi esnasında elde edilen atık YFC miktarı, yaklaşık olarak 690.000 ton/yıldır (47).

2.4.1. Yüksek fırın cürufunun yapısı

YFC’nun ana bileşenleri; kireç, silika ve alümina gibi PÇ oksit bileşenleri ile aynıdır, ancak oranları farklıdır (46).

YFC’nun camsı yapısını önce kristal yapıdaki silika olan kuartzın yapısından yola çıkılarak açıklamak mümkündür. Kuartz, SiO_4 tetrahedronlarından oluşan düzgün kristal yapıya sahiptir. Bu yapıyı oluşturan tetrahedronların her köşesi birer başka tetrahedronla ortaktır. Camsı silikada, yukarıda belirtilen yapı, tetrahedronların düzgün ve birbirini düzenli olarak tekrarlayan şekilde dizilmesinin bazı Si-O-Si bağlarının kırılması ve araya bazı metal katyonlarının girmesi nedeniyle bozulmuştur (48).

YFC, fırından 1400-1500 °C sıcaklıkta erimiş halde çıkar. Bu erimiş cürufa uygulanan soğutma işlemlerinin şekline bağlı olarak farklı kalitede ve çeşitli kullanım yerleri bulunan cüruflar elde edilir (43).

YFC’nun ani soğutulması için iki yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi Granülasyon Yöntemi, ikinci ise Paletleme Yöntemidir. Granülasyon yönteminde, soğutma işlemi için çok miktarda su ($100 \text{ m}^3/\text{ton}$ cüruf) kullanılması zorunluluğu vardır. Bu işlem sonucunda cürufun içerdiği su miktarı yaklaşık % 30 civarındadır. Bu su, kurutucu değirmenler veya fitreli havuzlarda cüruflardan uzaklaştırılır. Elde edilen GYFC’nun özellikleri bakımından en iyi yöntem olmakla birlikte çok pahalı olması bu yöntemin kullanımını sınırlamaktadır. Öte yandan Kanada’da geliştirilmiş, daha yeni bir yöntem olan paletleme yöntemi daha yaygın kullanım alanı bulmuştur. Bu yöntem, yarı kurumuş proseste erimiş haldeki cüruf, önce suyla soğutulur daha sonra dakikada 300 tur atan bir tambur vasıtasıyla havaya fırlatılır. Kullanılan su

miktarı 1 ton cüruf için yaklaşık 1 m³'tür. İşlem sonucunda cüruf içinde kalan su miktarı % 10'nun altındadır (48).

Erimiş haldeki cüruf, yüksek fırından çıktığında hızlı olarak soğutulduğu takdirde akışkanlığındaki ani azalma kristal yapılaşmayı engeller ve camsı bir yapıda bir katı eriyik elde edilmesini sağlar. Bu, yarı kararlı camsı malzeme sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörler kullanılarak ya da ince öğütülmek ve PÇ'nun hidratasyonu ile ortaya çıkan Ca(OH)₂'yi kullanmak suretiyle, hidrolik özelliğe sahip olur (43).

Cüruflar, havada yavaşça soğutulursa gri, kristalli, yoğun bir katı kütle elde edilir. Bu cürufa, 'Havada Soğumuş Cüruf' adı verilir. Belirli bir miktar su kullanılarak daha çabuk soğutma ile kütle içinde su buharı hapsedilir ve gözenekli, bal peteği şeklinde, pumik'e benzeyen bir yapı elde edilir. Bu hafif malzeme 'Cüruf Köpüğü' olarak adlandırılır ve kırılıp sınıflandırıldığında hafif agrega olarak kullanılır (46).

Cürufun camsı kısmı bir X ışınları difraktogramında 20-30°'ye tekabül eden geniş bir pikle kendini gösterir. Camsı faz miktarı YFC'nun hidrolik özelliklerini belirleyici en önemli unsurlardan birisidir. Lea'nın (44), belirttiğine göre, camsı faz miktarıyla dayanım arasında, kabaca da olsa doğrusal bir ilişki söz konusudur (43).

Cürufun bağlayıcılığı, soğutma hızına, kimyasal bileşimine, mineral bileşimine, camsı yapılı bileşimine ve inceliğine bağlıdır (45).

2.4.2. Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu

YFC'nun hidrolik özelliklerinin belirlenmesindeki önemli parametrelerden birisi de kimyasal kompozisyonlarıdır. Genel olarak, cürufun alkalitesi ne kadar yüksekse hidrolik özelliğinin de o kadar iyi olduğu kabul edilir. Cürufların kimyasal kompozisyonlarıyla hidrolik özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmış olmakla birlikte, kesin ve basit kurallar bulunmuş değildir (44).

YFC'nun bileşimi, kullanılan cevherin yapısına, kireç taşının bileşimine, kok tüketimine ve üretilcek demirin cinsine bağlı olarak geniş bir aralıkta değişebilir. Bu faktörler, cürufun kireç, silika, alümina ve magnezyumdan ibaret olan dört ana bileşeni ile sülfür kükürdü, demir ve mangan oksitler gibi yan bileşenlerin oranını etkiler. Çeşitli YFC'ların kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2.4' de verilmiştir (46).

Çizelge 2.4. YFC'ların kimyasal analiz sonuçları (%) (46)

Kaynağı	CaO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	S
Karabük	37,04	35,61	17,57	6,96	0,39	1,24	1,26
Ereğli	39,58	35,27	12,31	6,05	1,91	1,89	2,02
İskenderun	35,15	35,15	14,84	10,0	0,47	1,67	1,24
İngiltere	38,42	32-37	10-22	3-9	0,4-13	0,3-1,0	1,1-24
Almanya	40-44	34-35	11-13	6-8	0,3-0,4	0,5-1,1	1,4-1,8
Fransa	40-48	29-36	13-19	2-8	0,5-3,8	0,1-1,0	0,4-1,5
ABD	36-45	33-42	10-16	3-12	0,3-2,0	0,2-1,5	-
Rusya	29-48	34-35	5-23	0-18	0,3-2,4	0,1-2,1	1,1

Genel olarak kireç % 30-50, silika % 28-38, alümina % 8-24, magnezyum % 1-18, kükürt % 1-2,5, demir ve mangan oksitler de % 1-3 arasında değişir (46).

Bir YFC'nun hidrolik özelliği, belirli bir sınır değere kadar, CaO/SiO₂ oranının artmasıyla artar. Ancak, bu sınır aşıldığında, diğer bir deyişle CaO miktarının çok yüksek olması durumunda granülasyon güçleştiğinden hidrolik özellikte bir azalma görülür. Sabit bir CaO/SiO₂ oranı için Al₂O₃ miktarının artması, cürufun aktivitesini artırır. Cüruf içindeki demir ve mangan oksitler dayanım özelliklerini olumsuz yönde etkiler. % 10'a kadar MgO bulunmasının dayanıma kötü bir etkisi bulunmaz. Ancak, daha yüksek MgO miktarı zararlı etkiler yaratabilir (44).

Kimyasal kompozisyon cürufun alkalinitesini belirlediği gibi camsı fazın niteliği hakkında da fikir verir. Cürufların kimyasal analiz sonuçlarından elde edilen çeşitli hidrolik modüller önerilmiştir. Bu modüller, cürufun içerdiği temel oksitler olan CaO (C), SiO₂ (S), Al₂O₃ (A) ve Mg (M) in birbirlerine oranlarıdır. Genel olarak

kabul edilen bir anlayışa göre, düşük modül değerleri düşük hidrolik reaktiviteyi göstermektedir. Ancak, her zaman, hidrolik modüllerin yüksek olması dayanımlarının da yüksek olmasını sağlamamaktadır (43).

YFC'lerinin hidrolik modülleri konusunda çok sayıda araştırma yapılmış ve yapılmaktadır. Bu çalışmalarda daha karmaşık başka modüllerde önerilmiştir. Bu önerilerde, toplam kimyasal analiz sonuçlarının ve kristal faz miktarının cürufun hidrolik özelliklerinin tespiti açısından birlikte değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, optimal reaktivite için cürufun tamamıyla camsı yapıya sahip olması zorunluluğunun bulunmadığı saplanmıştır (43).

Yüksek miktarda MgO içeren YFC'lerinin hidrolik özelliklerinde bir miktar olumsuzluk görülmekte birlikte, cüruf içindeki MgO, PÇ olduğu şekilde bir hacim sabitliği problemi yaratmaz. YFC'lerinde, tamamıyla kristal yapıda oldukları ekstrem durumlarda dahi, serbest MgO bulunmaz (44).

ASTM C 151'de belirtilen otoklavla hacim sabitliği deneyinin uygulandığı % 20'ye varan MgO miktarlarına sahip farklı cüruflar kullanılmış olan PYFCC hiçbir hacim sabitliği problemine rastlanmamıştır (44).

2.4.3. Cürufli çimentolar

Avrupa Çimento Standardında (EN 197-1) Portland Cüruf Çimentosu genel adı altında iki (II/A-S ve II/B-S), YFC Çimentosu adı altında ise üç (III/A, III/B, III/C) olmak üzere % 6'dan % 95' e kadar değişik miktarlarda YFC içeren, toplam beş çimento tanımlanmıştır. Ülkemizde YFC çimento CEM III/A % 36-65, CEM III/B % 66-80, CEM III/C % 81-95 (13) adları altında üç farklı çimento bulunmakta ve sülfata dayanıklı (SÇ 32,5) çimento standardı bulunmaktadır (49)

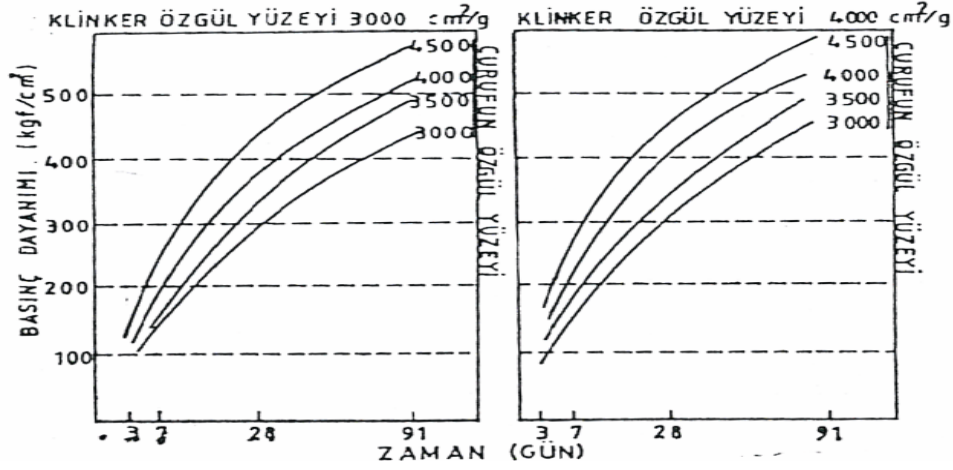
Cürufli çimentolar (CÇ), GYFC' nun PÇ klinkeri ve alçı taşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülüp karıştırılmasıyla elde edilir. CÇ üretiminde kullanılan cüruf miktarı, değişik ülkelerde çimento tipine de bağlı olarak, önemli farklılıklar göstermektedir. A.B.D.'nde ASTM C 595'de belirtilen Portland Yüksek Fırın Cüruf Çimentolarında

(PYFCC) cüruf oranı % 25-65'dir. Almanya'da DIN 1164'de iki tip cürufllu çimento tanımlanmıştır. Bunların birincisi cüruf miktarı en fazla % 40, ikincisinde ise % 41-85'dir. Fransa'da ise % 25-35, % 40-55, % 65-75 ve % 80' in üzerinde GYFC içerir (44).

Çeşitli CÇ imalinde kullanılacak 'Granüle Cüruf'; erimiş cürufu aşırı miktarda su içinde akıtarak veya üzerine su veya su ile hava püskürterek çok hızlı bir soğutma sonunda elde edilir. Amaç, cürufu aniden soğutarak kristalleşmesini önlemek ve camsı fazda (amorf) katılaşmasını sağlamaktır. Bu şekilde cüruf, camsı taneciklerden hafif köpüğe kadar büyüklükleri değişen küçük parçacıklara da ayırır. Granüle cüruf olarak adlandırılan bu ürün, esas itibarıyla çimento imalinde kullanılır. Granülasyondan maksat, kristallik olmayan mümkün olduğu kadar camsı kütle halinde bir ürün elde etmektir. İşlemin başarısı, cürufun kimyasal bileşimine ve fırından çıkış sıcaklığına bağlıdır. Silisli cüruflar, soğurken kolaylıkla camlaşır, yüksek kireçli cürufların kristalleşmesini önlemek daha güçtür. Ancak yüksek kireçli cürufların yüksek çimentolaşabilme aktivitelerinden dolayı granüle cüruf üretiminde tercih edilir (46).

Genel hatlarıyla, üretim enerjisi ve hammadde kullanımı değerlerine bakıldığında, 1 tonda % 65 cüruf (% 15 rutubetli) içeren bir cürufllu çimento üretimi için 1 ton PÇ üretiminde gerekli olan hammadde miktarı yaklaşık % 65, kullanılan enerji miktarında ise yaklaşık % 50'lik bir azalma sağlar (48).

PÇ klinkeri ile cüruf birlikte öğütülebileceği gibi ayrı ayrı öğütülerek sonra da karıştırılabilir. Birlikte öğütmede, daha yumuşak olan klinker daha güç öğütülmüş olur. % 50-60 arasında cüruf ihtiva eden bir çimentonun ilk dayanımı esas itibarıyla klinker inceliği belirlenir. Sonraki dayanımlarda da cüruf inceliği daha çok etkilidir. Daha yüksek cürufllu çimentolarda cüruf inceliği ilerleyen yaşlarda daha belirleyicidir. Şekilde 2.2.'de klinker ve cüruf inceliğinin yaşa göre basınç dayanımına etkisini göstermektedir (46).



Şekil 2.2. Farklı inceliklerde % 75 cüruf ihtiva eden çimentoların basınç dayanımları
(46)

PYFCC rengi, PÇ'ndan daha açık ve özgül ağırlığı PÇ'dan daha düşüktür. PÇ'nda olduğu gibi çeşitli tuzlar priz süresini etkiler. Mesela jips, priz süresini geciktirirken, klorür hızlandırır ve ilk sertleşmeyi artırır (46).

YFC'lu çimento aşağıda belirtilen yapı türlerinde sağlam ve dayanıklı beton üretiminde tek seçim olarak kullanılması uygundur. Bu yapıları şöyle sıralayabiliriz;

- ❖ Asitli ve tuzlu sulara maruz yapılar,
- ❖ Deniz yapıları
- ❖ Kütle betonlar
- ❖ Sıcak iklim şartları altında kalan tüm yapılar (50).

2.4.4. Cürufllu çimentolarla üretilen betonlar

Taze beton özellikleri

İşlenebilme: YFC, klinkere göre daha az yüzey pürüzlüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının daha düşük olması dolayısıyla hacimce daha fazla çimento hamuru elde

edilmesi CÇ'ların betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkileyeceğinin göstergesidir. Ancak bu iyileşme, çökme deneyi sonuçlarında tam olarak gözlenemez (43). Eşdeğer kohezyon için CÇ kullanımı, karışım suyu gereksinmesinde yaklaşık % 5'lik bir azalmaya yol açar (52).

Priz süresi ile zaman içindeki işlenebilme kaybı: CÇ'ların priz sürelerinin PÇ'larına göre daha uzun olduğu ve dolayısı ile zamanla işlenebilme kaybının da daha az olduğu yönündeki genel kanıya karşılık düşük sıcaklıklarda priz süresinin çok uzadığı, normal sıcaklıklarda ise PÇ'ları ile bir fark olmadığı saptanmıştır (51) Aynı şekilde, çökme kaybı konusunda CÇ'lar ile PÇ'ları arasında önemli fark bulunmaktadır (51, 53).

Terleme: Yapılan deneysel çalışmalarda, CÇ kullanılarak üretilmiş betonların hem terleme hızlarının hem de terleme miktarlarının daha fazla olduğu saptanmıştır. Öte yandan, şantiye koşullarında CÇ'ların neden olduğu terlemenin yarattığı ciddi problemlere ilişkin bir çalışma veya rapor bulunmamaktadır (51).

Hidratasyon Isısı: CÇ kullanımı, hidratasyon ısını azaltarak hem maksimum beton sıcaklığını düşürmekte hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır (51).

Sertleşmiş beton özellikleri

Dayanımlar: Eşit çimento miktarı ve eşit S/Ç oranları söz konusu olduğunda CÇ'lar normal PÇ'larına göre erken yaşlarda nispeten düşük, geç yaşlarda ise yüksek beton dayanım değerlerine neden olur (52).

Elastisite Modülü : CÇ kullanılarak yapılmış olan betonların elastisite modülü az bir miktar daha yüksek olmaktadır (52).

Rötre: CÇ'lar da üretilmiş betonların rötreleri konusunda yapılan araştırmaların sonuçları, deney koşulları ve kullanılan malzemelerin değişik olması nedeniyle

birbirlerinden farklılıklar göstermekle birlikte bu farklar çok önemli ölçüde değildir. Genel olarak ifade etmek gerekirse, CÇ kullanımının rötreyi PÇ'nun kullanıldığı durumdan daha değişik etkilemediği söylenebilir (51).

2.4.5. Cüruf standardı

Cüruf özellikleri, ulusal ve uluslar arası standartlara göre bu standartlarda agrega ve çimentolar için uygulanan deney yöntemleriyle belirlenen özelliklerdir. GYFC dışındaki cüruflar, GYFC kadar geniş kullanım alanı bulamadıklarından standartlarda bu cüruflardan söz edilmez. Genellikle cüruf sözcüğü, GYFC anlamında kullanılmaktadır (43).

Havada soğutulmuş YFC Agregaları : Betonda kullanılacak havada soğutulmuş YFC agregaları ile ilgili olarak ülkemizde 1993 yılında çıkarılmış olan TS 3787 “Beton Agregası – Havada Soğutulmuş Yüksek Fırın Cürufundan “ (54) standardı bulunmaktadır. TS 3787 esas itibarıyla BS 1047 “Specification for Air-cooled Blastfurnace Slag Aggregate for use in Construction” (55) örnek alınarak hazırlanmıştır. Her iki standart da en büyük dane boyutu 40 mm’yi kadar olan agregaları konu edinmektedir. Gerek TS 3787 ve gerekse BS 1047’de cüruf agregaları; bulma yöntemlerine göre, a) Havada soğutulmuş YFC beton agregası, b) İri cüruf agregası, c) Çukura dökme cüruf agregası ve d) Şev ve dökme cüruf agregası olarak dört gruba; boyutlarına göre ise a) İri agrega, b) İncesiz agrega ve c) İnce agrega olarak üç gruba ayrılır (43).

Çimento veya betonda kullanılabilecek GYFC’ları ilgili bir Türk standardı mevcut değildir. ASTM C 595 “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements” (56) standardında katkılı çimentolarda kullanılabilecek GYFC’ye ilişkin koşullar genel olarak belirtilmiştir. Bu standartta, GYFC’nin kullanılabilirliğinin belirleneceği deney yöntemi GYFC içeren çimentoların üretiminde uygulanan öğütme şekline göre değişiklik göstermektedir. Klinker ve cürufun ayrı öğütüldüğü durumlarda, ıslak eleme ile 45 µm elekte kalan % 20’den fazla olmayan bir incelikteki cürufun, 28 günlük aktivite endeksinin % 75’den yüksek olması gerekmektedir. Birlikte öğütme

koşullarında ise, cüruf aktivite endeksi bulunurken kullanılacak cürufun inceliğinin CÇ içindeki tahmini inceliğiyle aynı olması gerekmektedir (43).

2.4.6. Yüksek fırın cüruflarının kullanım alanları

Katkılı Çimento ve Beton Üretiminde: PÇ üretiminde kullanılan klinkerin bir miktarı azaltılarak, yerine GYFC konulmaktadır. Böylece ortaya “CÇ” veya demir PÇ gibi YFC katkılı çimentolar çıkmaktadır (57).

Beton içerisinde bağlayıcı madde olarak kullanılan PÇ’nun miktarı azaltılarak, çimento yerine çok ince öğütülmüş GYFC çimentosu katılmakta ve cürufli beton elde edilmektedir (58).

Puzolanik özellik gösteren öğütülmüş GYFC’nun, beton yapımında sağladığı yararlar, UK kullanımının sağladığı yararlar ile çok benzerdir. Ayrıca YFC’lu betonlar, sülfatlı ortamlara karşı oldukça yüksek dayanıklılık göstermektedir (59).

PÇ Üretiminde Hammadde Olarak Kullanımı: PÇ üretiminde hammadde olarak kullanılan kalker ve kilden kalsiyum oksit, silis ve alümin bulunduran YFC’dan sağlanabilmektedir (59).

Agrega Olarak kullanımı: Havada soğutulmuş YFC, oldukça sert bir yapıya sahiptir. Bu tür, cüruf kırılarak agregaya haline getirilmekte ve beton yapımında agregaya kullanılabilmektedir. Ancak, bu tür cürufların yapısında bulunabilecek bir miktar kükürt, betonun hacim sabitliğini etkileyebilmekte ve dayanıklılık sorunu yaratabilmektedir. O bakımdan, YFC’dan elde edilen agreganın beton yapımına uygunluğu deneylerle tespit edilmelidir. Genleştirilmiş veya köpürtülmüş olarak soğutulan cüruflar, gözenekli cüruflardır. Bu tür cürufların kırılması ile hafif agregaya elde edilmekte ve hafif beton yapımında kullanımı mümkün olabilmektedir (57).

Cüruf agregaları; normal ve ön üretimli beton üretiminde, yol ve hava meydanı betonlarında olduğu gibi köprü ve köprü elemanları, geçirimsizliği düşük beton boru

yapımında kullanılmaktadır. Ancak sülfür ve betonda hacim sabitliğini etkileyecek bileşenler bakımından uygunluğu deneyle saptanmalıdır (60).

Diğer kullanım alanları: Atık dolgu malzemesi, Yol malzemesi, Stabilizasyon malzemesi, seramik hammaddesi olarak (59).

2.4.7. Yüksek fırın cürufu ile ilgili yapılan önceki çalışmalar

CÇ ile yapılan bir çalışmada, betonların klor iyonlarına daha az geçirimli olduğu ve böylelikle korozyona daha az kaldığı tespit edilmiştir (50).

YFC'nun bir başka üstünlüğü de, 28. günden sonra da mukavemet artışının devam etmesidir. Şantiyelerde yapılan deney sonuçları şöyledir: 7. gün 170 kgf/cm², 28. günde 300 kgf/cm², 60. günde 350 kgf/cm², 90. günde 365 kgf/cm²'dir (50).

Güllü (61), PÇ 42,5 çimentosu kullanılarak 0.4, 0.5 ve 0.6 S/Ç oranlarında 25, 100 ve 175 mm referans çökmelere sahip şahit betonları üretilmiştir. UK ve YFC'nun (% 100 UK- % 0 YFC), (% 50 UK- % 50 YFC), (% 0 UK- % 100 YFC) bileşenlerinde ve toplam bağlayıcıların ağırlıkça % 5, 10, 20, 40, 60 ve 80 yer değiştirme oranlarında katkı maddesi olarak kullanılmasıyla PÇ deney numuneleri üretilmiştir. Mineral katkının % 10'dan fazla ikame oranlarında genel olarak YFC bağlayıcıların standart kıvam suyu ihtiyacında küçük bir azalmaya, işlenebilirlikte ise artmaya sebep olmuştur. Ayrıca YFC'nun yaklaşık bütün ikame oranlarında hava içeriğini azaltmıştır.

Köksal (62), Su/Çimento oranı 0.4, 0.5 ve 0.6 olan 125 mm çökmeye sahip olan betonlar araştırılmıştır. PÇ 42,5, çimentonun kütlege % 0, 10, 20, 40, 60 ve 80 oranlarında UK ve YFC ikame edilmiştir. Bu puzolanik katkı maddelerinde kül ve cüruf içeriği ikame yüzdesine bağlı olarak % 0, % 50, % 100 alınmıştır. % 20'ye kadar ikameli betonların mukavemetleri kontrol numunesininkine yakın veya daha yüksek olduğu görülmüştür. Beton içerisindeki ikame maddesinin betonun hacmini artırdığı, betondaki büzülmenin % 80 ikame oranı dışındaki tüm oranlarında kontrol

numunesinden daha düşük olduğu gör÷lmüştür. % 40 katkı maddesinin % 50 UK ve % 50 YFC olarak PÇ yerine ikame edilmesiyle üretilen betonların en yüksek ıslanma-kuruma dayanıklılığına sahip olduğu belirlenmiştir.

Doğulu (63), İskenderun Demir Çelik Fabrikası'ndan alınan YFC' öğütölerek inceliğinin, cüruf çimentosunun bir kısmının yerine kullanıldığında bağlayıcı özelliğine etkisi, hazırlanan harç karışımlarının 3, 7, 28 ve 91. günlerde çekme-eğilme ve basınç mukavemetleri test edilerek incelenmiştir. Portland-öğütölmüş GYFC harçları, tek bir çeşit PÇ ve 3000, 3200, 3700, 3900 ve 4400 cm² / g Blain incelik değerlerinde olmak üzere beş değişik incelikte öğütölmüş ve ağırlıkça % 25, % 35 ve % 45 olmak üzere üç karışım oranında karıştırılmıştır. Deney sonuçları göstermektedir ki, cüruf inceliği artıkça harcın mukavemeti de artmaktadır. Ancak, karışım oranının etkisi test edilen zaman bağılıdır. Erken mukavemetler için, cüruf miktarı azaldıkça mukavemet artarken, sonraki günler için (91 gün) cüruf miktarı artıkça, mukavemet kazanımı da artmaktadır.

Yaprak ve arkadaşları (64) yaptıkları bu çalışmada, Kardemir YFC ile Çayırhan ve Çatalağzı UK'lerinin süper akışkanlaştırıcı katkılı beton özelliklerine etkisini araştırmıştır. UK ve YFC ağırlıkça % 0, % 10, % 20 ve % 30 oranlarında PÇ ile ikame edilerek süper akışkanlaştırıcı katkılı betonlar üretilmiştir. YFC ve UK ikameli betonlar, hem birbirleri ile hem de PÇ 42,5 ile üretilmiş olan kontrol betonu ile karşılaştırılmıştır. En yüksek basınç dayanımı, % 10 UK ve % 20 YFC ikameli betonlarda elde edilmiştir (64).

2.5. Uçucu Kül

Elektrik enerjisi elde edebilmek amacıyla kullanılan iki önemli üretim kaynağından birisi hidroelektrik enerjisi sağlayan barajlar, diğeri genellikle yakıt olarak toz kömürün kullanıldığı termik santralleridir. Türkiye'deki toplam elektrik enerji üretiminin yaklaşık olarak yarısı termik santrallerinden sağlanmaktadır (42).

Termik santrallerde enerji üretiminde yakıt olarak kullanılan toz kömür, atık olarak değişik karakterde küllerin ve cürufun ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu ince kül parçacıkları, elektrostatik yöntemler ve siklonlarda yakalanmakta, baca gazları ile atmosfere çıkışları engellenmektedir. Bu şekilde elde edilen küle ‘uçucu kül’ adı verilir. UK’lerin yanı sıra bir miktar iri parçalı kül baca gazları ile taşınamayarak yanıp kazanın tabanına düşmekte ve ‘taban külü’ adına almaktadır. Ayrıca, kazanın dibinde bir miktar da cüruf da oluşabilmektedir. Atık malzeme olarak elde edilen küllerin yaklaşık % 70-80’ni UK oluşturmaktadır (42).

Termik santrallerde çok ince öğütülerek yakılan kömürden aşağıda belirtilen üç farklı külün elde edilmesi mümkündür (65):

- ❖ Göreceli olarak iri taneli olup baca gazları ile taşınamayan ve kazan tabanına düşen “taban külü”,
- ❖ Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutularak uzaklaştırılması ile elde edilen “ham kül”,
- ❖ Çok ince olup baca gazları ile taşınan “uçucu kül”.

Çevreyi olumsuz olarak etkileyecekleri için, UK’lerin santral bacasından çıkarak havaya karışmaları önlenir. Bu amaçla, küller mekanik ve elektrostatik yöntemlerle toplanarak santral çevresine veya başka uygun yerlere depolanır. Zamanla biriken küller geniş alanları kaplamaya başlar ve santral idaresi için bir problem oluşturabilir (65).

Termik santrallerde kullanılan taş kömürünün % 10-15’i, linyit kömürünün ise % 20-40’ı küldür. Termik santral, 1 kwh’lik elektrik enerjisi üretimi yaklaşık 110 g külün atık madde olarak ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, 1000 mw’lık bir santraldan bir yılda yaklaşık 650 000 ton UK ve taban külü elde edilmektedir. Bu mertebedeki bir kül üretiminin depolanabilmesi için yılda 60 000 m², santralin hizmet süresi olarak kabul edilen 30 yıllık süre içinde ise 1 800 000 m² civarında bir araziye ihtiyaç bulunmaktadır (66).

Türkiye’de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermekte olup, bu santrallerden yılda toplam 13 milyon ton kadar UK elde edilmektedir. Ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığı azaltmanın bir yolu da, endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılmayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santralde kullanmaktan geçmektedir. Dolayısıyla yıllık UK miktarının gelecekte daha fazla artacağı tahmin edilmektedir (65).

Ülkemizde kömüre dayalı termik santrallerin optimum kazan gücünün 150 MW olduğu ve yakılan kömürün % 20 civarında kül bırakan kömür olduğu varsayılırsa ortaya çıkacak sorunun boyutu Çizelge 2.5.’deki değerlerden kolayca anlaşılabilir (66).

Çizelge 2.5. Kömüre dayalı termik santrallerde kazan ve kömürden elde edilen kül miktarı

	1 kg kömürden	150 MW’lık kazandan
Taban külü (cüruf)	40 g	9 t/saat
Temizlenmemiş baca gazında kül	-	20 g/m ³
Temizlenmiş baca gazında kül	-	0,4 g/m ³
Uçucu kül	17.5 g	23,5 t/saat

2.5.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri

UK içinde başlıca SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO, bulunmakta ve bunların miktarı UK tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO, SO₃ ve alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. UK’deki küldeki temel oksitlerden SiO₂ % 25-60, Al₂O₃ % 10-30, Fe₂O₃ % 1-1,5 ve CaO % 1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler UK tipini karakterize etmektedir (66).

UK, kimyasal kompozisyonlarına göre değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır (42).

Kireç ve SO₃ Miktarına Göre Sınıflandırma: Bu sınıflandırmaya göre, a) esas yapısı silikoalüminatlardan meydana gelen ve genellikle taş kömüründen elde edilen UK Silikoalüminoz Uçucu Küller, b) genellikle linyit kömüründen elde edilen ve diğerlerine oranla yüksek miktarda SO₃ ve CaO içeren küllere Sülfokalsik Uçucu Küller ve c) yine genellikle linyit kömüründen elde edilen kireç ve silika miktarı yüksek uçucu küllere ise Silikokalsik Uçucu Küller adı verilir (67).

CaO Miktarına Göre Sınıflandırma: UK'ün içerdiği analitik CaO miktarına dayanmaktadır. Buna göre, CaO miktarı % 10'un altında olan uçucu küller, düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu, % 10'un üstünde olanlar ise yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu uçucu küller olarak adlandırılırlar (42).

UK sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 (3) ve TS EN 197-1 (13) standartları baz alınmaktadır (66).

ASTM C 618 standardına göre UK, F ve C sınıflarına ayrılmaktadır:

F Sınıfı UK : Bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ % 70'den fazla olan UK'lerdir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi % 10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı UK, puzolanik özelliğe sahiptir (66).

C Sınıfı UK : Linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃ miktarı % 50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda C sınıfı UK, CaO> % 10 olduğu için bu küller yüksek kireçli UK olarak da adlandırılırlar. C sınıfı UK, puzolanik özelliğin yanısıra bağlayıcı özelliğe sahiptirler (66).

TS EN 197-1'e göre ise UK, silisli (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar (13).

V Sınıfı UK : Çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerinden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif SiO₂ ve Al₂O₃ oluşan; geri

kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının % 10'dan az, reaktif silis miktarının % 25'den fazla olması gerekmektedir (66).

W Sınıfı UK : Hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO₂ ve Al₂O₃'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının % 10'dan fazla, reaktif silis miktarının da % 25'den fazla olması gerekmektedir (66).

2.5.2. Uçucu küllerin özellikleri

Kimyasal ve mineralojik bileşimi

UK'lerin kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orjini ve proses koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfirizasyon gibi) bağlıdır. (66).

Temel oksitler olan SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO'in miktarı, UK'ün silisli veya kireçsi yapıda olmasına göre geniş aralıkta değişmektedir. Buna göre, UK'de, SiO₂ % 25-60, Al₂O₃ % 10-30, Fe₂O₃ % 1-15 ve CaO % 1-40 arasında bulunmaktadır (68,69).

UK'deki reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve dayanım gelişiminde önemli rolü olan kalsiyum silikat hidrat jeli (C-S-H) oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle reaktif silis, külün aktif bileşimi olup, puzolanik reaksiyonlara girmek üzere alkali ortamda çözünen silistir. Reaktif silis miktarının, UK tipine bağlı olmaksızın en az % 25 olması gerekmektedir (66).

UK karbon içeriği, termik santralin verimliliğine bağlıdır. Genel olarak modern termik santrallerde bu miktar % 3'ün altındadır. UK kimyasal kompozisyonları YFC, kil ve PÇ ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.6'da verilmiştir (66).

Çizelge 2.6. UK tipik kimyasal kompozisyonlarının YFC, Kil ve PÇ ile karşılaştırması

Oksit	Silikoaluminöz UK	Sülfokalsik UK	Silikokalsik UK	YFC	Kil	PÇ
SiO ₂	50	18	38	30	50	22
Al ₂ O ₃	30	12	22	11	17	6
Fe ₂ O ₃	7	7	4	1	8	3
CaO	2,6	67	24	40	5	65
Mg	1,8	1,8	5	-	-	-
SO ₃	0,5	6	1	-	7	-
K ₂ O	5	6	2	-	0,4	-
Na ₂ O	0,8	8,2	1	-	0,4	-
Diğer	3	1,2	3	-	12,4	-

UK'lerin mineralojik bileşimi, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirit, alçıtaşı, karbonatlar) ve kömürün hazırlama ve yanma gibi koşullarına bağlıdır. UK'ün mineralojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımda olmak üzere, camsı (kristalsız) ve kristal yapılu bileşenlerden oluşmaktadır (65).

UK'ün mineralojik bileşimi, külün puzolanik özelliklerini etkilemektedir. Özellikle camsı fazın durumu UK reaktivitesinde etkin olmaktadır. Düşük kireçli UK'deki camsı fazın yapısı, SiO₂ açısından zengin, oldukça polimerize silisli veya alüminyum da içeren alüminosilikat bileşimindedir. Yüksek kireçli UK'de ise, aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camsı fazın yanı sıra aktif kristalize faz bulunmaktadır. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğin yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe sahip olmasını sağlamaktadır (69,70).

Fiziksel özellikler

UK, genel olarak gri renkte olup, içlerinde yanmamış karbon miktarı fazla olduğu takdirde renkleri daha koyudur. Tipik olarak küresel şekle sahip olan UK parçacıklarının çapları 0,5-150 µm arasında değişiklikler göstermektedir; bu

tanelerin %75'inin veya daha fazlasını çapı 45 µm'dan daha küçüktür. Kül parçacıklarının içi dolu veya boş olabilmektedir. İçleri boş kül tanelerinin miktarı külün ağırlığının yaklaşık olarak % 5'i, hacim olarak ta % 20'si kadardır. UK yoğunluğu 2-2,7 g/cm³ mertebesinde (59,65).

Camsı küresel şekilli tanecikler çeşitli tanecikler halinde bulunabilir (71). Küresel olmayan tanecikler, kömürden gelen ve yanma reaksiyonlarına katılmamış mineraller (kuvars, feldispatlar gibi), düzensiz şekilli ve gözenekli yapılardan (kil kalıntıları, yanmamış karbon gibi) oluşmaktadır (66).

Düşük kireçli UK'lerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen, içi boşluksuz tam küresel taneciklerdir. Bu küller, şekil dağılımı açısından genellikle homojen olan mikro yapıya sahiptirler (65). Yüksek kireçli küllerde, mikroyapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur (66).

2.5.3. Uçucu kül ile ilgili yapılan çalışmalar

Ataç (72), kalsiyum miktarı yüksek C tipi Çayırhan UK içeriğinin sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. UK, ağırlıkça % 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında çimento ile yer değiştirilmiştir. Bütün karışımlarda bağlayıcı içeriği 300 kg/m³'te su/bağlayıcı oranı ise 0,55'te sabit tutulmuştur. Yaklaşık 120 mm'lik bir çökme sağlamak için bir süper akışkanlaştırıcı kullanılmış. Deney numuneleri, kür havuzlarında, poliüretan örtü ve ıslak çuval altında, rutubetli bir odada olmak üzere üç farklı şekilde kür edilmiş ve numuneler 7, 28 ve 260 gün sonra basınç deneyine tabi tutulmuştur. Laboratuvar ortamında tutulan numuneler için UK içeriği artıka 28 günlük basınç mukavemetinin azaldığı, 28 güne kadar su içinde tutulan diğer numuneler ile 7 güne kadar nemli ortamda tutulan numuneler için basınç mukavemeti hemen hemen aynıdır. 260 günlük basınç mukavemetinde de UK ikame oranına bağılı olmak üzere azalma vardır.

Bilim (73), yüksek oranda kalsiyum içeren standart dışı bir UK'ün beton içinde kullanılabilirliğini araştırmak üzere bir laboratuvar çalışması yürütmüştür. Aynı UK'ün hızlandırılmış kür karşısındaki davranışı da incelenmiştir. Üç farklı bağlayıcı dozajında, su/bağlayıcı oranları 0,4 ve 0,87 arasında değişen, toplam 48'den fazla beton karışımı hazırlanmıştır. UK'ün PÇ % 0, 15, 30, 45 oranlarında ikamesiyle üretilen ve nemli ortamda kür edilen betonların 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. UK'ün standart dışı olması gerçeğine rağmen, laboratuvar sonuçları bu külün % 15 ve % 30 yer değiştirme oranları arasında beton içinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Gökçe (74), Seyitömer Termik Santralinden sağlanmış farklı inceliklerdeki küllerin betonun önemli bazı özellikleri üzerinde gösterdikleri etkileri karşılaştırılmıştır. Araştırmada kontrol serisi, üçü ince UK içeren seri, üçü orta incelikte UK içeren seri ve son üçü de iri UK içeren seri olmak üzere toplam 10 seri beton üretilmiştir. Her incelikte % 10, 20 ve 30 olmak üzere üç ayrı UK ikame oranı ile çalışılmıştır. Sertleşmiş beton üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases hızı, kılcal su emme, hacimsel su emme, birim ağırlık ve deniz ortamına dayanıklılık deneyleri yapılmıştır. UK irileştikçe ve ikame oranı arttıkça taze beton su ihtiyacı artmaktadır. % 10 ikame oranında farklı inceliklerde UK içeren serilerin su ihtiyaçları aynı olmuştur.

Korkmaz (75), deniz suyu etkisindeki UK betonlarının basınç dayanımını deneysel olarak incelemiştir. Bu amaçla hazır beton santralinde üretilen BS 20 betonu şahit beton kabul edilmiştir. Çayırhan termik santralinden elde edilen UK, çimento ağırlığının % 5, 10, 15, 20 oranlarında çimentonun bir kısmı yerine ikame edilerek 28, 90 ve 180 günlük 15x15x15 cm'lik 300 küp numune üretilmiştir. Karışımlarda karışım suyu olarak şehir şebeke suyu ve deniz suyu kullanılmıştır. Sonuçta en yüksek dayanımlar, % 5 ve % 10 ikameli betonlardan elde edilmiştir.

Dunstan ve arkadaşları (77), yüksek oranda UK kullanarak orta ve düşük geçirimsizlik katsayısına sahip betonlar üretebileceğini belirtmişlerdir (76). Uyan ve arkadaşları

% 10'luk UK ilavesinin, betonun kılcallık ve su emme özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Tunçbilek (78), Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Kangal, Orhaneli, Yatağan UK'lerinin Portland-UK sistemleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Her termik santralden, filtrelerin birinci ve ikinci kademelerinden olmak üzere iki farklı numune alınmış ve aradaki farklar incelenmiştir. Karışımlarda çimento ağırlığının % 10, 20 ve 30'u kadar kül kullanılmıştır. Normal kıvam, priz süresi, hacim genleşmesi, su ihtiyacı ve dayanım deneyleri yapılmıştır. UK yüksek oranda kullanılmadığı takdirde, tatmin edici geç dayanımlar elde etmek mümkün olmakla birlikte nispeten düşük erken dayanımlar beklenmelidir. Yüksek oranda kireç ve sülfat içeren C sınıfı UK dışında kalan küllerin kullanımıyla dayanıklılığı geliştirmek mümkündür.

Atiş (79), yüksek oranda UK kullanımı ile elde edilen betonun aşınmaya karşı direncini deneysel olarak incelemiştir. UK'ün aşınma üzerindeki etkisi karşılaştırma yapılarak araştırılmıştır. Değişik miktarlarda UK kullanılarak farklı betonlar elde edilmiş ve süper akışkanlaştırıcı yardımı ile farklı işlenebilirlikte betonlar üretilmiştir. Bu betonlar Dorry aşındırma makinasında deneye tabi tutulmuştur. Beton basınç dayanımı arttıkça aşınma dayanımı da artmıştır. Çok yüksek beton basınç dayanımlarında, yüksek oranda UK kullanımı (% 70 yer değiştirme) ile üretilen betonun aşınma direncinin, aynı basınç dayanımına sahip UK konulmadan üretilen betonun aşınma direncinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Deney çalışmalarında, kontrol çimentosu olarak PÇ 42.5, agrega olarak kırma taş, puzolan olarak Çankırı Diyatomit (ÇD), YFC ve (Uçucu Kül) UK kullanılmıştır.

3.1.1. Agrega

Çalışmada, İstaş Hazır Beton Fabrikasından temin edilen 0-4 mm ve 4-16 mm olmak üzere iki farklı grup kırma agrega kullanılmıştır. TS 707 “Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunelerinin Hazırlanması” (80) standardına uygun olarak alınan agregaların su emme ve özgül ağırlık deneyleri, TS 3526 “Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini” (81) standardına göre agrega doymun kuru yüzey halindeyken yapılmıştır. Agregaların granülometrik bileşimi, TS 3530 EN 993-1 “Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Elemente Metodu” (82) standardına göre belirlenmiş ve agregaların özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kırma taş agregaların özellikleri

Agrega Boyutu (mm)	Elekten geçen (%)							Özgöl ağırlık (gr/cm ³)	Su Emme (%)	Hafif madde oranı (%)	Organik madde oranı (%)
	0,25	0,5	1	2	4	8	16				
4-16	0	0	0	0	0	6	97	2,71	0,71	Yok	Yok
0-4	1	3	51	76	100	100	100	2,7	0,77	Yok	Yok

3.1.2. Çimento

Deneylerde, kontrol çimentosu olarak Set Ankara Çimento Fabrikası ürünü olan PÇ 42,5 çimentosu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan çimentonun kimyasal analizi,

TS EN 196-2 “Çimento Deney Metotları – Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi” (83) standardına göre belirlenmiştir. Çimentoların fiziksel özellikleri, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini” (84), TS EN 196-6 “Çimento Deney Metotları – Bölüm 6: İncelik Tayini” (85) standardına göre ve mekanik özellikleri ise TS EN 196-1 “Çimento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım tayini” (86) standardına göre test edilmiştir. PÇ 42,5 çimentosunun kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Üretilen çimentolara ait kodlama şöyledir: Çankırı Diyatomi İkameli Çimento (ÇDİÇ), Yüksek Fırın Cüruf İkameli Çimento (YFCİÇ) ve Çayırhan Uçucu Kül İkmali Çimento (UKİÇ) olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. PÇ 42,5 çimentosu ile puzolanların özellikleri

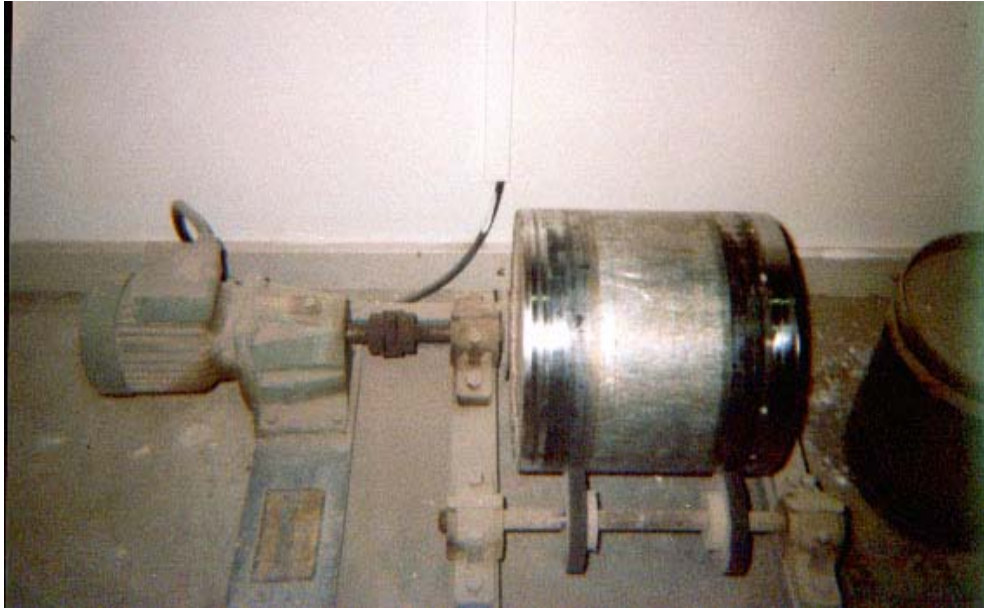
Kimyasal Analiz	PÇ 42,5	ÇD	YFC	UK	TSE EN 197-1
CaO	62,72	0,73	30,28	12,31	
SiO ₂	20	87,27	37,65	45,25	
Al ₂ O ₃	4,92	2,64	12,36	11,17	
Fe ₂ O ₃	3,76	0,5	0,54	6,75	
MgO	1,84	0,29	16,55	12,16	
SO ₃	2,65	0,07	0,45	3,68	
K ₂ O	0,73	0,25	0,88	1,84	
Na ₂ O	0,26	0,00	0,59	4,12	
Kızdırma Kaybı(%)	2,54	1,27	1,2	1,2	≤ % 5
Çözünmeyen Kalıntı(%)	0,4	5,34	0,3	0,25	≤ % 5
Fiziksel Özellikler					
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,02	2,01	2,97	2,27	
Özgül Yüzey (blaine) (cm ² /g)	3220	4470	2400	3378	
200 µm elek üstü kalan (%)	0	1,15	0,1	5,4	
90 µm elek üstü kalan (%)	0,8	5,1	3,15	20,95	
40 µm elek üstü kalan (%)	15,2	15,2	33,6	38,85	
Priz Başlangıcı (saat/dk.)	2:30	-	-	-	≥ 60
Priz Sonu (saat/dk.)	3:40	-	-	-	
Hacim Genleşmesi (mm)	3	-	-	-	≤ 10

3.1.3. Diyatomit

Çalışmada kullanılan diyatomit, Çankırı-Çerkeş yöresinden alınmıştır. Ham halde alınan ÇD uygun incelik değerine getirmek için Resim 3.1.'deki bilyalı değirmende öğütülmüştür. ÇD'nin kimyasal analizi, Ankara Set Çimento Fabrikası Fizik Laboratuvarında yapılmıştır. ÇD'nin fiziksel özellikleri ise ilgili standartlara göre deneylerle belirlenmiştir. ÇD'nin fiziksel ve kimyasal analizi Çizelge 3.2'de verilmiştir.

3.1.4. Yüksek fırın cürufu

Beton karışımlarında kullanılan YFC, Ereğli Demir Çelik Fabrikasından alınmıştır. YFC, uygun incelik değerine getirmek için Resim 3.1.'deki bilyalı değirmende öğütülmüştür. YFC'nin kimyasal analizi Ankara Set Çimento Fabrikası laboratuvarında yapılmıştır. YFC'nin fiziksel özellikleri ise ilgili standartlara göre deneylerle belirlenmiştir. YFC'nin fiziksel ve kimyasal analizi Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Resim 3.1. Pozolanların öğütülmesinde kullanılan Linatex marka bilyalı değirmen

3.1.5. Uçucu kül

Beton karışımlarında, Çayırhan Termik Santralinden temin edilen UK kullanılmıştır. UK'nin kimyasal analizi Ankara Set Çimento Fabrikası laboratuvarında yapılmıştır. UK'nin fiziksel özellikleri ise ilgili standartlara göre deneylerle belirlenmiştir. UK'nin fiziksel ve kimyasal analizi Çizelge 3.2'de verilmiştir.

3.1.6. Karışım suyu

Beton karışımlarının hazırlanmasında karışım suyu olarak Ankara şehir içme suyu kullanılmıştır.

3.2. Metot

Beton karışımları ve taze beton deneyleri İstaş Hazır Beton laboratuvarında yapılmıştır. Üretilen beton numuneleri Özel Pelin Beton Laboratuvarında kürlenmiştir. Basınç dayanımı deneyleri Özel Pelin Beton Laboratuvarında, aşınma dayanımı deneyleri DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Beton Laboratuvarında yapılmıştır. Çimento ve puzolanlar ile ilgili deneyler ise Set Ankara Çimento Fabrikası Fizik Laboratuvarında yapılmıştır.

3.2.1. Beton karışım hesabı

Beton karışım hesabı, TS 802 “Beton Karışım Hesap Esasları” (8) standardına göre yapılmıştır. Karışım hesapları yapılırken betonun uygulama yerleri dikkate alınarak bazı kabuller yapılmıştır. En büyük agrega tane büyüklüğü $D_{max} = 16$ mm, agrega tane sınıfları 0-4 mm ve 4-16 mm, slump değeri 7 cm ve hava miktarı % 2 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 3.3'te 1 m³ beton karışımına giren malzeme miktarları verilmiştir. Araştırmada, bütün betonlarda s/ç oranı sabit tutulmuştur. Puzolanlar ağırlıkça % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında çimento ile ikame edilerek beton karışımlarda kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. 1 m³ karışıma giren malzeme miktarı

Beton Türleri	Karışıma giren malzemeler							
	Agrega (kg)		Karışım Suyu(l)	S / Ç	PÇ 42,5	ÇD	YFC	ÇUK
	İri	İnce						
KB	834,87	1070,5	167	0,5	315	-	-	-
%5 ÇDİB	834,87	1070,5	167	0,5	299,25	15,75	-	-
%10 ÇDİB	834,87	1070,5	167	0,5	283,5	31,5	-	-
%15 ÇDİB	834,87	1070,5	167	0,5	267,75	47,25	-	-
%20 ÇDİB	834,87	1070,5	167	0,5	252	63	-	-
%5 YFCİB	834,87	1070,5	167	0,5	299,25	-	15,75	-
%10 YFCİB	834,87	1070,5	167	0,5	283,5	-	31,5	-
%15 YFCİB	834,87	1070,5	167	0,5	267,75	-	47,25	-
%20 YFCİB	834,87	1070,5	167	0,5	252	-	63	-
%5 UKİB	834,87	1070,5	167	0,5	299,25	-	-	15,75
%10 UKİB	834,87	1070,5	167	0,5	283,5	-	-	31,5
%15 UKİB	834,87	1070,5	167	0,5	267,75	-	-	47,25
%20 UKİB	834,87	1070,5	167	0,5	252	-	-	63

3.2.2. Deney programı

Çalışmada Çizelge 3.4’de verilen deney programı kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Deney programı

Beton Çeşidi	Numune Sayısı		
	28 Gün	90 Gün	180 Gün
KB	3	3	3
% 5 ÇDİB	3	3	3
% 10 ÇDİB	3	3	3
% 15 ÇDİB	3	3	3
% 20 ÇDİB	3	3	3
% 5 YFCİB	3	3	3
% 10 YFCİB	3	3	3

% 15 YFCİB	3	3	3
% 20 YFCİB	3	3	3
% 5 UKİB	3	3	3
% 10 UKİB	3	3	3
% 15 UKİB	3	3	3
% 20 UKİB	3	3	3

Toplamda 13 farklı beton karışımından 117 adet numune üretilmiştir. Üretilen betonlara ait kodlama şöyledir: Çankırı Diyatomiti İkameli Beton (ÇDİB), Yüksek Fırın Cüruf İkameli Beton (YFCİB) ve Çayırhan Uçucu Kül İkameli Beton (UKİB) olarak gösterilmiştir. Örneğin % 10 ÇDİB, % 10 Çankırı diyatomit ikameli betonu, % 15 YFCİB, % 15 YFC ikameli betonu ve % 20 UKİB, % 20 Çayırhan UK ikameli betonu, PÇ 42,5 ile üretilen beton Kontrol Betonu (KB) ile ifade etmektedir.

3.2.3. Numune boyutları, betonun dökümü ve bakımı

Beton karışımları, 40 dm³ hacimli düşey eksenli mikserde hazırlanmıştır. Homojen bir beton karışımı elde etmek için karışım kurallarına dikkat edilmiştir. Karışım, önce kuru halde 1 dk, su katıldıktan sonra 4 dk daha karıştırılmıştır. Karıştırma tamamlandıktan sonra taze beton deneyleri yapılmış ve beton, önceden temizlenip yağlanmış 100x100x500 mm'lik kalıplara dökülmüştür. Sıkıştırma işlemi daldırma vibratörü kullanılarak yapılmıştır. Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve deney gününe kadar 20⁰C ± 1⁰C sıcaklığa sahip su tankında kür edilmiştir.

3.2.4.Çimento deneyleri

Standart kıvam tayini

Standart kıvam tayini deneyi, TS EN 196-3 (84) standardına göre yapılmıştır. Deneyde, Vicat sondası ve halkası, Toni Teknik marka karıştırıcı ve 0,1 g duyarlılıkta Sartorius Basic marka elektronik terazi kullanılmıştır. Çimento numunesinden, 500 g tartılarak alınmış ve çimento kütlelerinin % 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 standart kıvam olarak tespit edilmiştir

Priz süreleri

Priz başlangıcı ve sona erme süreleri, TS EN 196-3 (84) standardına göre yapılmıştır. Deney için; RMU-Testing Equipment marka otomatik Vicat aleti ve halkası, Toni Teknik marka karıştırıcı ve 0,1 g duyarlılıkta 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 sonu süresini kayıt etmektedir.



Resim 3.2. Priz deneylerinde kullanılan otomatik vicat aleti

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.

Hacim genleşmesi

Hacim genleşmesi deneyi, TS EN 196-3 (84) 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 genleşmesi deneyi yapılması gerekir (84).

Deney, standart kıvam deneyi için hazırlanan çimento hamurundan 20-30 g alınarak yapılmıştır. Çimento hamuru, 5x5 cm ebadındaki yağlanmış cam bir levha üzerine konulan yine 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 aleti, durumu bozulmadan içerisinde bulunan suyun sıcaklığı $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ olan bir kapı 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 miktarı 10 mm'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.

Özgöl ağırlık

Çimentoların özgül ağırlık deneyleri, sarsıntısız bir ortamda Le Chatelier balonu kullanılarak TS EN 196-6 (85) standardına 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 numuneleri ÇDİÇ için 25 g, YFCİÇ için 55 g ve UKİÇ için 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 :

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

Formülde;

d : Özgül ağırlık (g/cm^3)

m : Çimentonun ağırlığı (g)

V₁ : İlk okunan hacim (cm³)

V₂ : Son okunan hacim (cm³) 'i ifade etmektedir.

Çimento incelik tayini

Çimento incelik tayini deneyi, TS EN 196-6 (85) standardına göre yapılmıştır. Deneyde Resim 3.3.'de görülen emiş kapasitesi 12500 Pa olan Alpine marka incelik ölçüm cihazı (hava basıncı ile otomatik emme sistemi) kullanılmıştır. 105 °C ± 2 °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 ve 3 dk.süre ile elenmiştir. Eleme işlemi sonunda, elekler üzerinde kalan miktarlar tartılarak kaydedilmiştir. Elek üzerinde kalanlar, bir sonraki elek üzerine aktarılarak işleme devam edilmiş ve numunelerin tane büyüklükleri tespit edilmiştir.



Resim 3.3. Alpine marka incelik ölçüm cihazı

Hava geçirgenlik (blaine) deneyi

Özgül yüzey deneyleri, Resim 3.4.'de görülen Tonindustrie-Seger marka Blaine cihazı kullanılarak TS EN 196-6 (85) standardına göre yapılmıştır. Blaine cihazı, hava geçirgenliği prensibine dayanarak çimentoların özgül yüzeyini tayin etmek için kullanılan bir cihazdır. Deney numunesi miktarları, TS EN 196-6'da (85) belirtilen hesaplama yöntemi ile belirlenerek etüv kurusu çimentolar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çimento numuneleri daha önce deneyle belirlenen özgül ağırlıkları göre, ÇDİÇ 25 g, YFCİÇ ve UKİÇ 55 g tartılarak numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, TS EN 196-3'te (84) tarif edilen geçirgenlik hücresine yerleştirilmeden, önce geçirgenlik hücresine kullanılmamış karbon kağıdı yerleştirilmiştir. Daha önceden tartılan numuneler dikkatlice silindire aktarılmıştır. Silindire yerleştirilen numune üstüne tekrar kullanılmamış karbon kağıdı düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Son olarakta TS EN 196-3'te (84) tarif edilen delikli disk yardımı ile numune geçirgenlik hücresi cihaza bağlanmıştır. Cihazdaki manometre kolu açılarak geçen hava süre cinsinden okunmuş ve aşağıdaki formülde okunan süre yerine konularak hava geçirgenlik (blaine) değeri hesaplanmıştır.



Resim 3.4. Tonindustrie-Seger marka blaine cihazı

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

Burada,

S : Özgül yüzey (cm²/g)

K : Cihaz sabiti,

e : Yatağın porozitesi,

t : Ölçülen zaman, (sn)

p : Çimentonun yoğunluğu (g/cm³)

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

Kimyasal analiz

PÇ 42,5 ve pozolanların kimyasal analizleri, TS EN 196-2 “Çimento Deney Metotları – Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi” (83) standardına göre Set Ankara Çimento Fabrikası Kimya Laboratuvarında yaptırılmıştır.

3.2.5. Taze beton deneyleri

Çökme (slamp) deneyi

Çökme deneyi, TS EN 12350-2 “ Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi” (87) göre yapılmıştır. Deneyin sonucu, ölçüleri belli olan huniye doldurularak sıkıştırılan taze beton yüksekliğinin, huni çekilip alındıktan sonraki beton yüksekliği ile kıyaslanması ile elde edilir. Aradaki yükseklik farkı, çökme değeri olarak alınmıştır.

Deney numunesi, betonu temsil edecek şekilde alınmış ve deney her bir beton karışımı için yapılmıştır. Çökme deneyi, dolaylı olarak s/b oranı hakkında bilgi vermektedir. Hazırlanan taze betonun çökme deneyi, beton kalıba yerleştirilmeden önce yapılmıştır. Çökme hunisi ve tablası, temizlenip ıslak bir bezle silindikten sonra düzgün bir yere yerleştirilmiştir. Huninin 1/3’ü beton ile doldurularak şişleme çubuğu ile 25 defa şişlenmiştir. Sonra 1/3’ü daha doldurulmuş ve bir önceki tabakaya 2,5 cm girecek kadar 25 defa şişlenerek sıkıştırılmıştır. Kalan 1/3 kısmı da doldurularak yine 25 defa şişlenmiş ve mala ile yüzey düzeltildikten sonra huni yavaşça kaldırılarak ve beton kütesinin yanına konmuştur. Huninin üst yüzeyinden yatay olarak uzatılan çelik çubuk ile çöken beton kütesi arasındaki mesafe çelik cetvelle ile ölçülerek kaydedilmiştir.

Birim ağırlık deneyi

Taze betonun birim ağırlık deneyi, TS 2941 “Taze Betonda Birim Ağırlık, Verim ve Hava Miktarının Ağırlık Yöntemi ile Tayini” (88) standardına uygun olarak yapılmıştır. Birim hacim ağırlığı, belirli bir hacim içerisinde sıkıştırılarak yerleştirilmiş taze betonun birim hacmine uygun gelen ağırlığının kg/m^3 olarak gösterilmesidir. Deneye başlamadan önce, agrega tane büyüklüğüne uygun ölçme kabı seçilmiş ve kabın boş ağırlığı kayıt edilmiştir. Hazırlanan beton karışımından numune alınmış ve üç tabaka halinde şişlenerek sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi

bittikten sonra kabın kenarlarına tokmak ile 10-15 kere vurularak beton içinde olan boşluk ve hava kabarcıkları giderilmiştir. Betonun yüzeyi, sıyırma levhası ile düzeltildikten sonra kap terazide tartılmıştır. Önceden tartılarak bulunan kap ağırlığı düşülerek betonun net ağırlığı, aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanmıştır:

$$P_b = \frac{W_n}{V_k} \quad [3.3]$$

Burada;

P_b = Taze betonun birim hacim ağırlığı (kg/m^3)

V_k = Ölçme kabının kalibre edilmiş hacmi (m^3)

$$W_n = W_d - W_b \quad [3.4]$$

Burada:

W_n = Ölçme kabındaki betonun net ağırlığı (kg)

W_d = Dolu kap ağırlığı (kg)

W_b = Boş kap ağırlığı (kg)

Hava miktarı tayini

Taze betonda hava miktarının tayini, TS EN 12350-7 “Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 7: Hava İçeriğinin Tayini-Basınç Metotları” (88) standardına uygun olarak basınç metodu ile yapılmıştır. Beton karışımı hazırlandıktan sonra deney numunesi yaklaşık eşit hacimlerde üç tabaka halinde ölçme kabına yerleştirilmiştir. Her tabaka 25 defa şişleme yöntemi ile sıkıştırılmıştır. Her tabakanın şişlenmesinden sonra kabın

kenarlarına 10-15 kere vurularak beton içinde kalan boşluk ve hava kabarcıkları giderilmiştir. Şişleme işlemi bittikten sonra sıyırma çubuğu ile kabın tam dolu ve beton yüzeyinin düzgün olması sağlanmış, kapak oturma yeri iyice temizlendikten sonra kapak yerleştirilip kilitlenmiştir. Hava hücresi ile ölçme kabı arasındaki ana hava musluğu kapatılarak kapaktaki iki boşaltma musluğu açılmış ve cihaza su ilave edilmiştir. Bu işlem, diğer musluktan su çıkıncaya kadar devam ettirilmiş ve cihaz hafifçe sarsılarak havanın tamamen musluktan dışarıya çıkması sağlanmıştır. Hava boşaltma musluğu kapatılarak, manometre göstergesi ile basınç çizgisine gelinceye kadar hava pompalanmıştır. 3-5 saniye sonra göstergenin durumunu sabitleştirmek için tekrar hava pompalanmış bazen de boşaltılmıştır. Sonra kapaktaki boşaltma muslukları kapatılmış ve hücre ile kap arasındaki ana hava musluğu açılmıştır. Göstergenin sabitleşmesi sağlandıktan sonra ibrenin gösterdiği hava miktarı okunup kayıt edilmiştir. Bu işlemler, her bir beton tipi için ayrı ayrı yapılarak hava miktarları yüzde (%) cinsinden belirlenmiştir.

Vebe deneyi

Taze betonda kıvam deneyinin Ve-Be metodu ile tayini TS EN 12350-3 “Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 3: Vebe Deneyi” (89) standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu metot işlenebilirliği az olan taze beton kıvamının tayininde uygundur. Deneye başlamadan önce aparatın sağlam bir tabana oturup oturmadığı ve kabın vidalar ile sabitleştirildiği kontrol edilmiştir. Çökme hunisi, kabın içine yerleştirilmiş ve taze beton numunesin çökme hunisi yardıyla kaba uygun olarak doldurulmuş ve 25 defa şişlenmiştir. Huninin üst yüzeyi mala ile tesviye edildikten sonra düşey doğrultuda yukarı dikkatle çekilip alınmıştır. Sonra şeffaf diskin sabitleştirme vidası gevşetilerek yavaşça alıştırılmış ve aynı anda geçen süre için saate bakılmıştır. Bu işlem yapılırken şeffaf disk üzerinden taze betonun nasıl sıkıştığına dikkat edilmiştir. Şeffaf diskin alt yüzeyi çimento harcı ile kaplandığı an, vibrasyon işlemi durdurulmuş ve geçen zaman saniye cinsinden kaydedilmiştir.

3.2.6. Serleşmiş beton deneyleri

Basınç Dayanımı Deneyi

Betonların basınç dayanımı deneyi, 100x100x100 mm’lik küp numuneler üzerinde TS EN 12390-3 “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini” (91) standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney, Üniversal deney makinasında 2.00 kN/sn yükleme hızı ile yapılmıştır. Numuneler, laboratuvar ortamında kurutulduktan sonra deneye tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda numunelerin taşıyabileceği maksimum basınç gerilmeleri kgf/cm² olarak belirlenmiştir. Numunelerin basınç dayanımı 28, 90 ve 180 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin basınç dayanımı, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$f_g = \frac{F}{A} \quad [3.5]$$

Burada;

f_g = Beton deney numunesi basınç dayanımı (kgf/cm²)

F= Kırılma yükü (kgf)

A= Deney numunesi kesit ortalama alanı (cm²)

Aşınma dayanımı deneyi

Aşınma dayanımı deneyi, 100x100x100 mm’lik küp numuneler üzerinde ASTM C 944 “Standart Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar surfaces by the Rotating- Cutter Method” (92) standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney, Soiltest marka aşınma cihazı kullanılarak 28, 90 ve 180 günlük numuneler üzerinde

gerçekleştirilmiştir. Standarda uygun olarak her yüzey için aşınma zamanı 2 dakika, numune üzerine etki eden yük 197 N olarak alınmıştır. Cihazın dönme hızı, 200 devir /dk olarak ayarlanmıştır. Numuneler, laboratuvar ortamında kurutulduktan sonra deneye tabi tutulmuştur. Deneye başlamadan önce numuneler, 0,01 g hassasiyetli Precisa XB 6200D marka dijital terazide tartılarak ağırlıkları kaydedilmiş sonra aşınma cihazına yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Deney, numunenin üç ayrı yüzeyinde 2 dakika olmak üzere toplam 6 dakika sürmüştür. Her 2 dakika sonunda numune üzerindeki kırıklar ve tozlar, fırça ile temizlenip numune tartıldıktan sonra tekrar aşınma işlemi yapılmıştır. Deney sonunda, ilk ağırlık ile 6 dakika aşınma sonrası ağırlık arasındaki fark hesaplanmış ve yüzde olarak verilmiştir. “Rotating-Cutter” cihazı ve çalışma düzeneği Resim 3.5.’de ve deney numuneleri Resim 3.6’da gösterilmiştir.

Deney numunelerinin aşınma dayanımı, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$C = \frac{A - B_s}{A} \times 100 \quad [3.6]$$

Burada;

C = Aşınma miktarı (%)

A = Aşınan deney numunesinin ilk ağırlığı (g)

B_s = Aşınan deney numunesinin 6 dk aşınma yapıldıktan sonraki ağırlığı (g)



Resim 3.5. Betonların aşınma deneyinde kullanılan Rotating Cutter cihazının görünüşü



Resim 3.6. Beton numunelerinin aşınma deneyinden sonraki görünüşleri

4. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

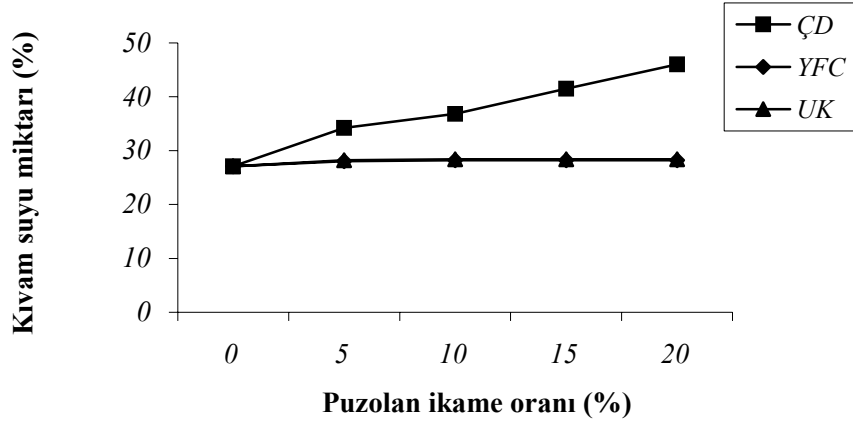
4.1. Pozolanların Çimento Özelliklerine Etkisi

4.1.1. Pozolanların standart kıvama etkisi

PÇ 42,5 ile ÇD, YFC ve UK ikameli çimento hamurlarının standart kıvam su ihtiyaçları, Çizelge 4.1`de verilmiştir. Şekil 4.1`de ise standart kıvam suyu-puzolan ikame oranı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1`de görüldüğü gibi, çimentoda ÇD oranı arttıkça standart kıvam suyu miktarı da artmış ve kontrol çimentosu olan PÇ 42,5`dan % 26-70 fazla olmuştur. Bu durum, gözenekli bir yapıya sahip olan diatomitin suyu bünyesine emmesiyle açıklanabilir. Benzer sonuçlar, önceki araştırmalarda da elde edilmiştir (4,18,93). YFC ve UK kullanıldığında ise durum farklıdır. Her iki pozolan da çimentoda ikame oranı artmasına karşılık çimentonun standart kıvam suyu miktarını hemen hemen hiç değiştirmemiştir.

Çizelge 4.1. Çimentoların standart kıvam suyu ihtiyaçları

Çimento	Standart Kıvam Suyu (%)
PÇ 42,5	27,1
% 5 ÇDİÇ	34,2
% 10 ÇDİÇ	36,8
% 15 ÇDİÇ	41,5
% 20 ÇDİÇ	46,0
% 5 YFCİÇ	28,0
% 10 YFCİÇ	28,2
% 15 YFCİÇ	28,2
% 20 YFCİÇ	28,2
% 5 UKİÇ	28,2
% 10 UKİÇ	28,4
% 15 UKİÇ	28,4
% 20 UKİÇ	28,4



Şekil 4.1. Standart kıvam suyu-puzolan ikame oranı ilişkisi

4.1.2. Puzolanların priz süresine etkileri

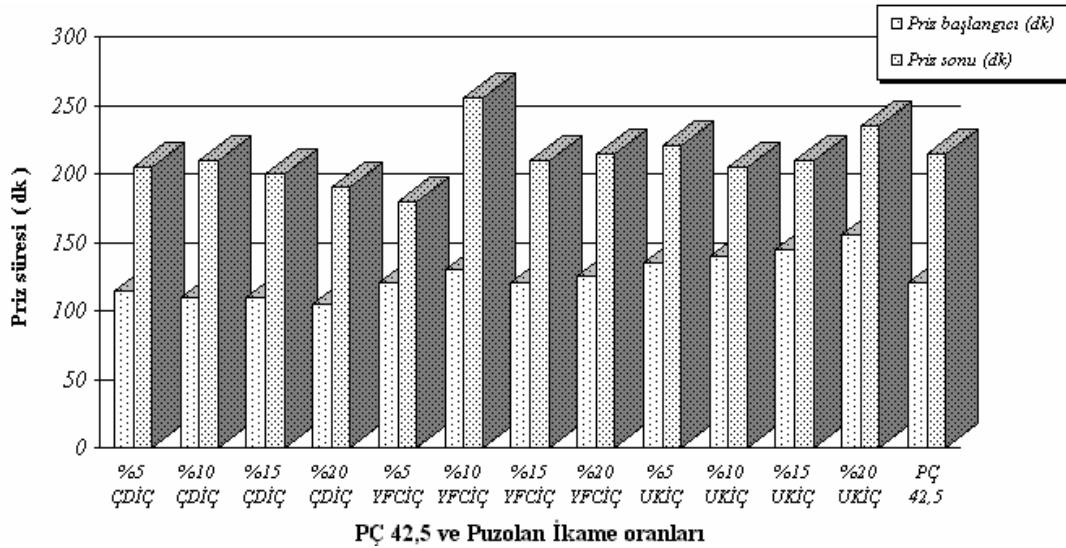
PÇ 42,5 ve puzolan ikameli çimentoların priz süresi ve hacim genleşmesi deney sonuçları Çizelge 4.2`de verilmiştir.

Çizelge 4.2. PÇ 42,5 ve puzolan ikameli çimentoların priz süreleri ve hacim genleşmesi değerleri

Çimento tipi	Priz başlangıcı (dk)	Priz sonu (dk)	Hacim genleş. (mm)
PÇ 42,5	150	220	3
%5 ÇDİÇ	115	185	2
%10 ÇDİÇ	110	195	2
%15 ÇDİÇ	110	200	3
%20 ÇDİÇ	105	205	3
%5 YFCİÇ	120	180	2
%10 YFCİÇ	130	205	2
%15 YFCİÇ	130	210	2
%20 YFCİÇ	140	225	2
%5 UKİÇ	135	205	2
%10 UKİÇ	140	205	2

%15 UKİÇ	145	220	2
%20 UKİÇ	155	235	2

Şekil 4.2 deki priz süresi-puzolan ikame oranı ilişkisinde görüldüğü gibi priz süreleri, Çizelge 3.2’de verilen TS EN 197-1 [13] standardı sınır değerleri içerisinde yer almaktadır. Çimentoda ÇD oranı arttıkça standart kıvam suyu miktarının artmasına karşılık priz süreleri artmamıştır. YFC ve UK’de ise standart kıvam suyu aynı kalırken priz süreleri ikame oranı artışına paralel olarak artmıştır. Puzolanlarda, priz başlangıcı; en düşük 105 dk ile % 20 ÇDİÇ’da, en yüksek ise 145 dk ile % 15 UKİÇ’da olmuştur. Priz sonu; en düşük 180 dk ile % 5 YFCİÇ, en yüksek ise 235 dk ile % 20 UKİÇ’da sonuçlanmıştır.



Şekil 4.2. PÇ 42,5 ve puzolanlı çimentoların priz süresi-ikame oranı ilişkisi

4.1.3. Puzolanların hacim genişlemesine etkisi

PÇ 42,5 ve puzolanlı çimentoların hacim genişmesi deney sonuçları, Çizelge 4.2 'de verilmiştir. Çimentoların hacim genişmesi-ikame oranı arasındaki ilişki, Çizelge 3.2’de çimentoların hacim genişmesi sınır değerleri TS EN 197-1’e göre ≤ 10 mm olduğu görülmektedir.

En yüksek hacim genleşmesinin 3 mm ile % 15-20 oranlarına sahip ÇDİÇ’da olduğu görülmektedir. Diğer çimento türlerinin birbirlerine çok yakın veya aynı değerleri aldığı görülmektedir.

4.2. Pozolanların taze beton özelliklerine etkisi

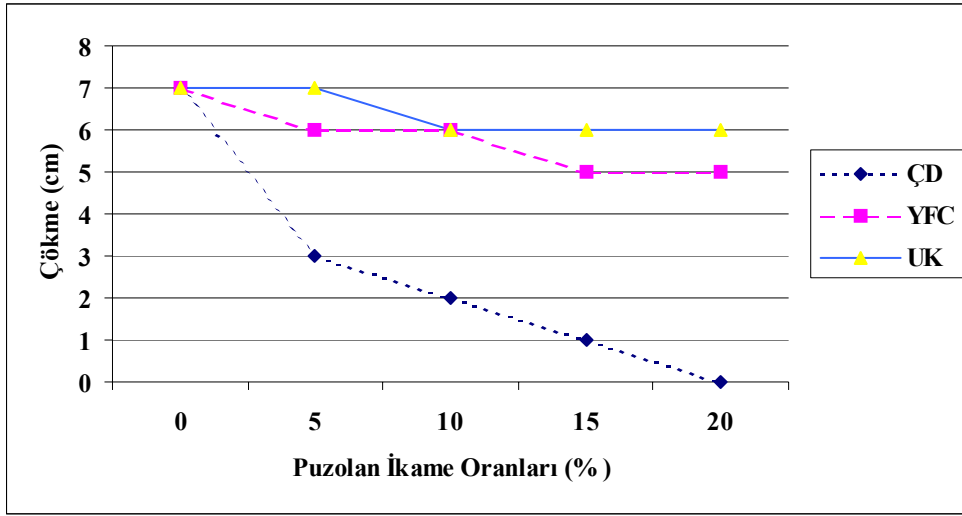
KB ile pozolan ikameli betonlara ait çökme, vebe, birim ağırlık ve hava miktarı taze beton deney sonuçları Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3. KB ve pozolan ikameli betonların fiziksel özellikleri

Beton Türü	Çökme (cm)	Vebe(s)	Birim Ağırlık(gr/cm ³)	Hava Miktarı(%)
KB	7	10	2,220	3,0
%5 ÇDİB	3	13	2,260	3,1
%10 ÇDİB	2	15	2,330	3,2
%15 ÇDİB	1	17	2,330	3,3
%20 ÇDİB	0	20	2,380	3,3
%5 YFCİB	6	7,0	2,400	3,0
%10 YFCİB	6	9,0	2,390	2,9
%15 YFCİB	5	9,0	2,390	3,0
%20 YFCİB	5	10	2,370	3,0
%5 UKİB	7	8,0	2,375	3,0
%10 UKİB	6	8,0	2,368	3,0
%15 UKİB	6	8,0	2,314	2,8
%20 UKİB	6	9,0	2,300	2,8

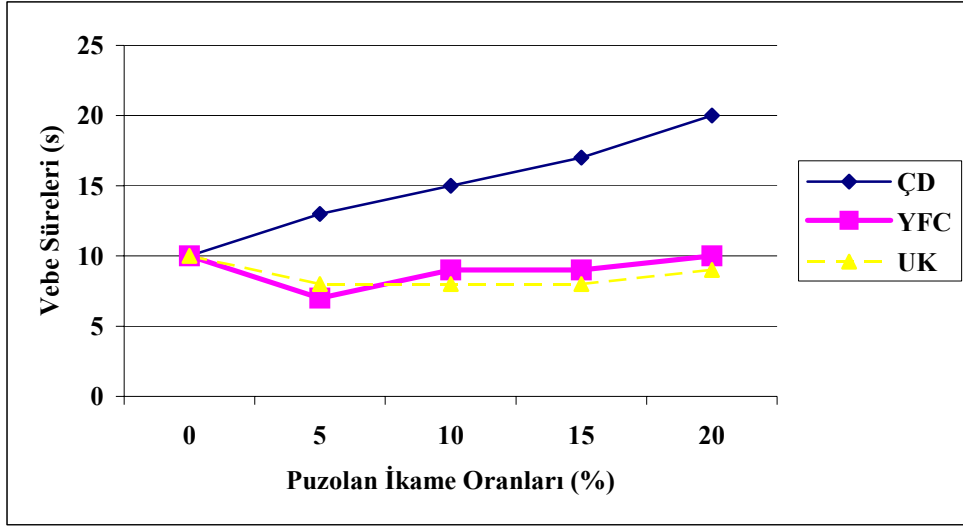
Betonların çökme değerlerine bakıldığında KB’nun istenen değerde bulunmakla birlikte pozolan ikameli betonlardan ÇDİB’nun ikame oranı artıkça çökmesi azalmış ve % 20 ikame oranında çökme değeri ölçülememiştir. Bu durum, üretilen betonlarda s/b oranının sabit alınması ve diatomitin yüksek su emme özelliğinden dolayı karışım suyunu absorbe etmesiyle açıklanabilir. YFCİB’da çökme miktarı, KB’nuna göre ikame oranı artmasına karşılık azalmıştır. UKİB ise işlenebilme aynı olmakla birlikte yüzeyde su kusmaları gözlenmiştir. UKİB’da görünüm olarak çökme miktarının artacağı gözlenmiş ama deney sonuçları, gözlem ile ters orantılı olarak

gerçekleşmiştir. Üretilen betonların çökme-puzolan ikame oranı ilişkisi, Şekil 4.3`de verilmiştir.



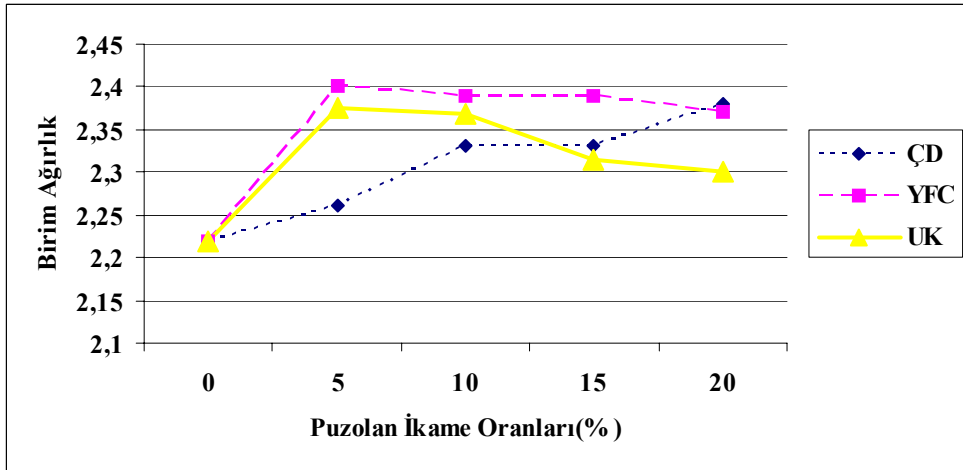
Şekil 4.3. Üretilen betonlarda çökme-puzolan ikame oranı ilişkisi

Vebe deney sonuçları, çökme değerleri ile ters orantılı olarak azalmıştır. Çünkü s/b oranı sabit alınmıştır. %15 ÇDİB ve %20 ÇDİB`da yerleştirme zorluğu tespit edilmiştir. Diyatomitli betonlarda s/b oranının artırılması veya akışkanlaştırıcı kullanılması halinde işlenebilirliğin artacağı söylenebilir. Puzolanlı çimentoların özgül ağırlıkları, PÇ 42,5 göre daha hafif olmasından dolayı karışıma giren puzolan hacimleri arttığından karışım suyu gereksinimi de artmıştır. KB ve puzolanlı betonların Vebe deney sonuçları, Şekil 4.4`de verilmiştir



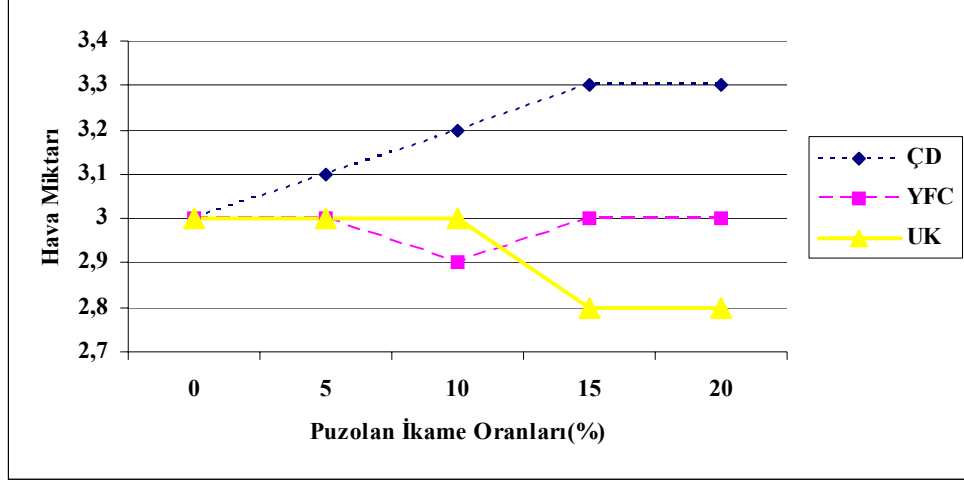
Şekil 4.4. Üretilen betonların hava miktarı-pozolan ikame oranı ilişkisi

Taze beton birim ağırlığı sonuçları incelendiğinde, pozolanların taze beton birim ağırlığı üzerinde önemli bir etkisi yoktur. KB ve pozolanlı betonların taze beton birim ağırlığı deney sonuçları, Şekil 4.5`de verilmiştir.



Şekil 4.5. Üretilen betonların birim ağırlık-pozolan ikame oranı ilişkisi

Hava miktarın deney sonuçlarında da KB'na göre önemli bir değişiklik görülmemiştir. KB ve puzolanlı betonların hava miktarın-puzolan ikame oranı ilişkisi, Şekil 4.6'da verilmiştir



Şekil 4.6. Üretilen betonların hava miktarı-puzolan ikame oranı ilişkisi

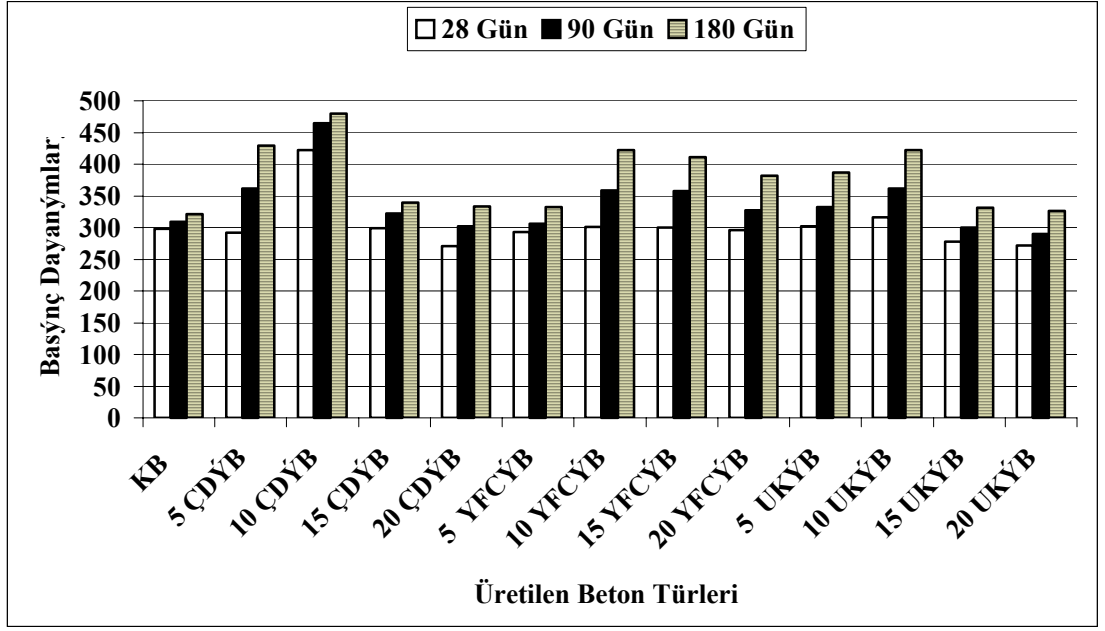
4.3. Puzolanların basınç dayanımına etkisi

KB ve puzolan ikameli betonların basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Üretilen betonların basınç dayanımı-numune yaşı ilişkisi ise Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Üretilen betonların basınç dayanımları

Beton Türleri	Basınç Dayanımları (kgf/cm ²)		
	28 Gün	90 Gün	180 Gün
KB	298	309	321
5 ÇDİB	292	362	429
10 ÇDİB	422	465	480
15 ÇDİB	299	322	339
20 ÇDİB	271	302	333
5 YFCİB	293	306	332
10 YFCİB	301	359	422
15 YFCİB	300	358	411

20 YFCİB	296	327	382
5 UKİB	302	332	387
10 UKİB	316	362	422
15 UKİB	278	300	331
20 UKİB	272	290	326



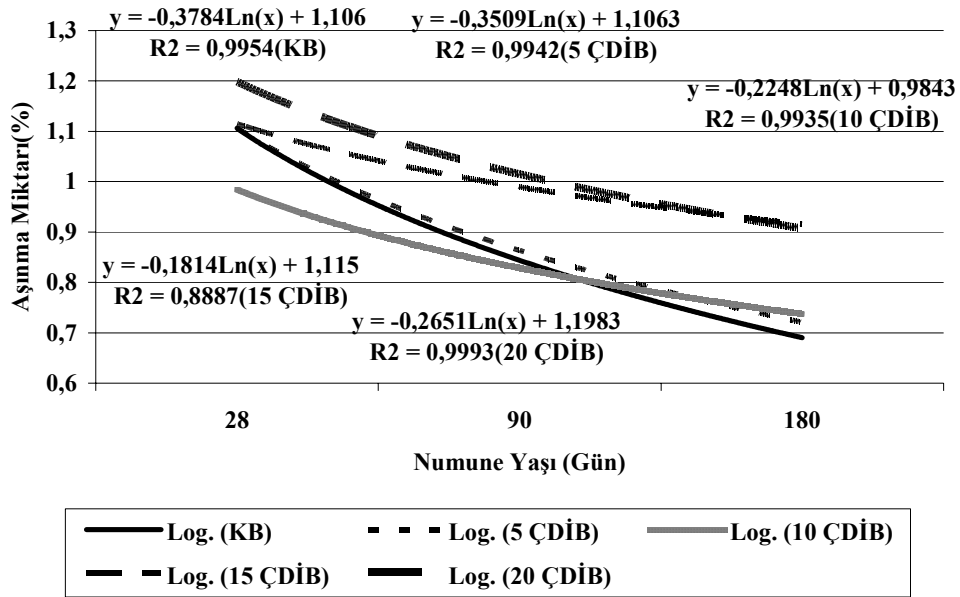
Şekil 4.7. Üretilen betonların basınç dayanımları

28 günlük dayanımlar göstermiştir ki, % 10 ÇDİB, % 15 ÇDİB, % 10 YFCİB ve % 15 YFCİB, % 5 UKİB ve % 10 UKİB, KB'dan daha yüksek dayanım kazanmıştır. Diğer ikame oranlarında ise dayanım KB'undan düşüktür. 28 günlük en yüksek dayanımı 422 kgf/cm² ile % 10 ÇDİB, en düşük dayanımı ise 271 kgf/cm² ile % 20 ÇDİB'dur. 90 günlük basınç dayanımlarına bakıldığında, 28 günlük basınç dayanımlarına ek olarak % 5 ÇDİB ve % 15 YFCİB'da, KB'dan daha yüksek dayanım kazanmıştır. 90 günlük en yüksek dayanımı 465 kgf/cm² ile % 10 ÇDİB, en düşük dayanımı ise 290 kgf/cm² ile % 20 UKİB'dur. 180 günlük basınç dayanımları ise puzolanların özelliklerinden “geç dayanımlar üzerinde etkilidir” özelliğine uygun olarak bütün puzolanlı betonların dayanımları KB'dan daha yüksek dayanım kazanmışlardır. 180 günlük en yüksek dayanımı 480 kgf/cm² ile % 10 ÇDİB, en düşük dayanımı ise 321 kgf/cm² ile KB'dur.

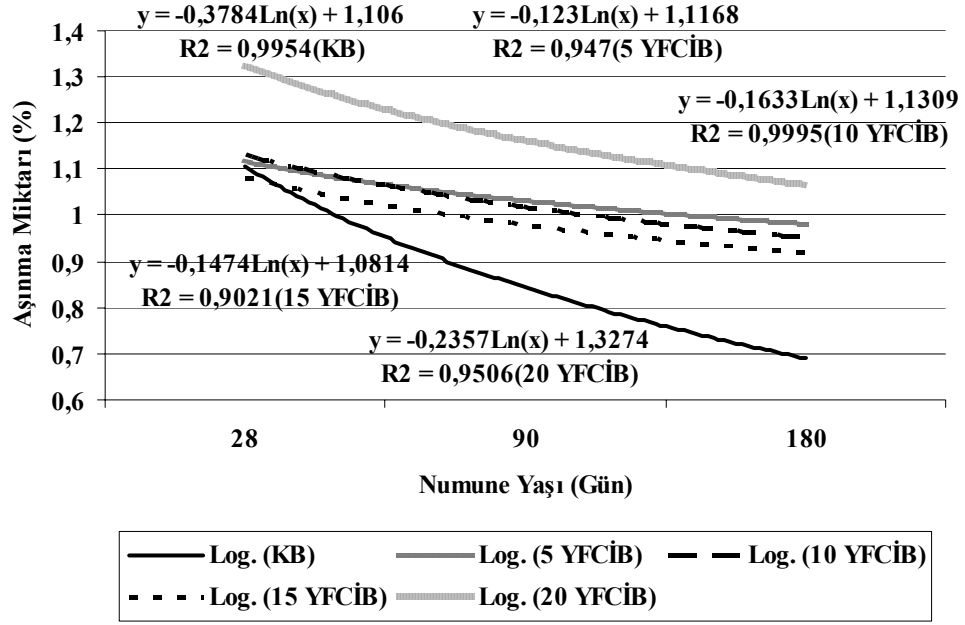
4.4. Puzolanların Aşınma Dayanımına Etkisi

4.4.1. Puzolanların 28 günlük aşınma dayanımına etkisi

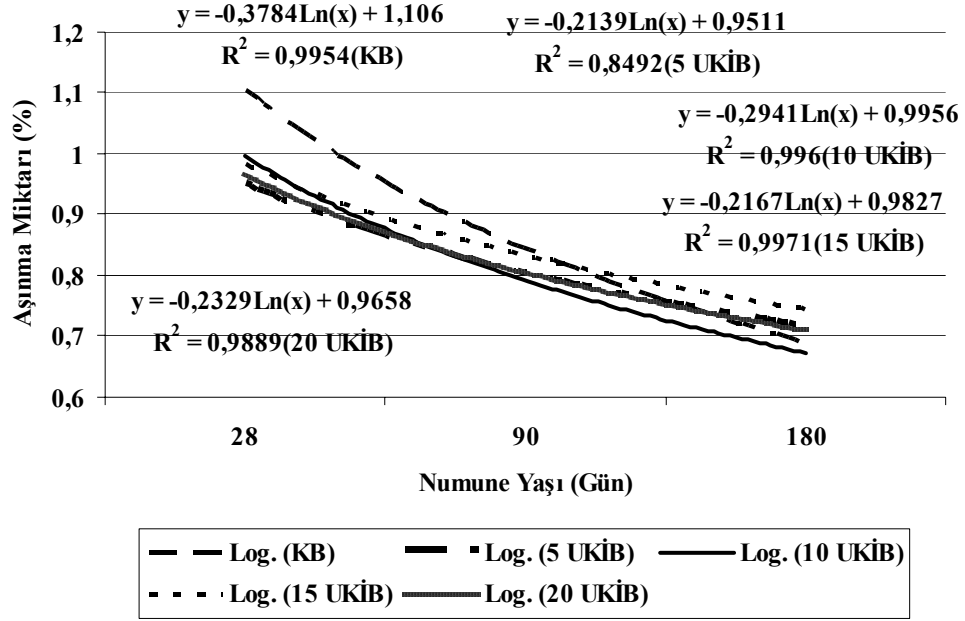
KB ile puzolan ikameli betonların 28 günlük aşınma dayanımı sonuçları Çizelge 4.5’de, her bir puzolan için aşınma miktarı-numune yaşı ilişkisi ise Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Bu sonuçlar irdelendiğinde üretilen betonlar kendi içinde farklılıklar göstermiştir. Puzolanlı betonların aşınma dayanımı, 28 günlük dayanımlar ile ters orantılı olmakla birlikte aşınma miktarını, agrega, puzolan özellikleri, çimento incelikleri ve puzolanların geç priz almaları aşınma miktarları üzerinde etkili olmuştur.



Şekil 4.8. KB ve ÇDİB aşınma miktarı-numune yaşı ilişkisi



Şekil 4.9. KB VE YFCİB aşınma miktarı-numune yaşı ilişkisi



Şekil 4.10. KB ve UKİB aşınma miktarı-numune yaşı ilişkisi

Çizelge 4.5. KB ve puzolanların 28. gün aşınma dayanım sonuçları (%)

Beton Türleri	28 günlük aşınma dayanımı sonuçları (%)			
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	Arit.Ort.
KB	1,06	1,14	1,09	1,10
5 ÇDİB	1,13	1,13	1,05	1,10
10 ÇDİB	1,01	0,95	0,98	0,98
15 ÇDİB	1,10	1,08	1,11	1,10
20 ÇDİB	1,22	1,23	1,16	1,20
5 YFCİB	1,15	1,05	1,13	1,11
10 YFCİB	1,11	1,26	1,03	1,13
15 YFCİB	1,07	1,06	1,07	1,07
20 YFCİB	1,38	1,24	1,40	1,34
5 UKİB	0,88	0,92	0,98	0,93
10 UKİB	1,08	0,92	1,01	1,00
15 UKİB	0,99	1,00	0,96	0,98
20 UKİB	0,98	0,88	1,01	0,96

ÇDİB’larda , 28 günlük aşınma dayanımları, % 5 ÇDİB ve % 15 ÇDİB ile KB ile aynıdır.ÇDİB’larda en yüksek dayanım, basınç dayanımında olduğu gibi % 10 ÇDİB da elde edilmiştir % 10 ÇDİB aşınma dayanımında da KB’ndan % 10,9 daha yüksek dayanıma sahiptir. % 20 ÇDİB ise KB’udan % 9 düşük dayanımlıdır.

YFCİB, 28 günlük aşınma dayanımları, % 5 YFCİB, %10 YFCİB, ve % 20 YFCİB’da % 0,9-% 21,8 arasında KB’na oranla aşınma dayanımı daha düşüktür. % 15 YFCİB aşınma dayanımında da KB’ndan % 2,7 daha yüksek dayanıma sahiptir. Basınç dayanımında olduğu gibi % 15 YFCİB KB’na oranla aşınma dayanımı yüksektir ama % 10 YFCİB için bu durum ters orantılıdır.

ÇUKİB, 28 günlük aşınma dayanımları bütün ikame oranlarında KB oranla aşınma dayanımı yüksektir. Burada % 15 UKİB ve % 20 UKİB basınç dayanımında KB oranla daha düşük dayanım göstermekle birlikte aşınma dayanımında bu etken görülmemiştir.

4.4.2. Puzolanların 90 günlük aşınma dayanımına etkisi

KB ile puzolan ikameli betonların 90 günlük aşınma dayanımı sonuçları Çizelge 4.6’da, her bir puzolan için aşınma miktarı-numune yaşı ilişkisi ise Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Bu sonuçlar irdelendiğinde üretilen betonlar kendi içinde farklılıklar göstermiştir.

Çizelge 4.6. KB ve puzolanların 90. gün aşınma dayanım sonuçları

Beton Türleri	90 günlük aşınma dayanımı sonuçları (%)			
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	Arit.Ort
KB	0,79	0,83	0,95	0,86
5 ÇDİB	0,99	0,83	0,81	0,88
10 ÇDİB	0,86	0,86	0,81	0,84
15 ÇDİB	0,97	1,09	1,02	1,03
20 ÇDİB	1,05	1,04	0,95	1,01

5 YFCİB	1,08	1,08	1	1,05
10 YFCİB	1,03	1,05	0,98	1,02
15 YFCİB	0,99	1	1,05	1,01
20 YFCİB	1,09	1,19	1,1	1,13
5 UKİB	0,87	0,87	0,85	0,86
10 UKİB	0,76	0,78	0,81	0,78
15 UKİB	0,85	0,86	0,8	0,84
20 UKİB	0,8	0,85	0,8	0,82

ÇDİB, 90 günlük aşınma dayanımları, % 5 ÇDİB, % 15 ÇDİB ve % 20 ÇDİB, KB'na göre aşınma oranı % 2,3-% 16,5 arasında daha yüksektir. % 10 ÇDİB ise KB oranla aşınma oranı % 2,3 daha azdır. ÇDİB'larda en yüksek dayanım, basınç dayanımında olduğu gibi % 10 ÇDİB da elde edilmiştir. Diğer ikame oranlarında ise basınç dayanımı ile ters orantı vardır.

YFCB, 90 günlük aşınma dayanımları, YFCİB aşınma dayanımı tüm ikame oranlarında KB'na göre % 17,4-% 31,3 arasında aşınmaya daha dayanıksızdır. Basınç dayanımı sonuçlarında % 5 YFCİB dışındaki ikame oranlarıyla ters orantılıdır.

ÇUKB, 90 günlük aşınma dayanımları, % 5 UKİB, KB ile aynı aşınma yüzdesine sahip olup diğer ikame oranlarında % 2,3-% 9,3 arasında aşınmaya daha dayanıklıdır. 90 günlük basınç dayanımları ile karşılaştırıldığında bulunan sonuçlar ters orantılıdır.

4.4.3. Puzolanların 180 günlük aşınma dayanımına etkisi

KB'nu ve puzolanlı betonların 90. gün aşınma dayanımı sonuçları Çizelge 4.7'de, her bir puzolan için aşınma miktarı-numune yaşı ilişkisi ise Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Bu sonuçlar irdelendiğinde üretilen betonlar kendi içinde farklılıklar göstermiştir.

Çizelge 4.7. KB ve puzolanların 180. gün aşınma dayanım sonuçları

Beton Türleri	180 günlük aşınma dayanımı sonuçları (%)			
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	Arit.Ort
KB	0,69	0,63	0,71	0,68
5 ÇDİB	0,74	0,70	0,68	0,71
10 ÇDİB	0,79	0,72	0,69	0,73
15 ÇDİB	0,89	0,91	0,88	0,89
20 ÇDİB	1,01	0,91	0,82	0,91
5 YFCİB	0,94	1,06	0,92	0,97
10 YFCİB	0,94	0,93	0,97	0,95
15 YFCİB	0,93	0,90	0,87	0,90
20 YFCİB	1,09	1,10	1,07	1,09
5 UKİB	0,68	0,68	0,68	0,68
10 UKİB	0,64	0,67	0,74	0,68
15 UKİB	0,74	0,77	0,72	0,74
20 UKİB	0,72	0,68	0,71	0,70

ÇDİB 180 günlük aşınma dayanımları, KB oranla ÇDİB tüm ikame oranlarında aşınma dayanımı daha azdır. Basınç dayanımı ile ters orantılı olmasının en önemli etkenlerinden biri diatomitin aşınmaya dayanımın yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır.

YFCİB 180 günlük aşınma dayanımları, KB oranla YFCİB tüm ikame oranlarında aşınma dayanımı daha azdır.

UKİB 180 günlük aşınma dayanımları, % 5 UKB ve % 10 UKİB aynı aşınma yüzdesine sahip olup KB ile aynı dayanıma sahiptir. % 15 UKİB ve % 20 UKİB ise KB oranla % 2,9- % 8,8 aşınmaya daha elverişlidir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Çankırı yöresi diyatomi, İskenderun Demir Çelik Fabrikası atığı olan YFC ve Çayırhan Termik Santral atığı UK'ün çimento ile ikame edilerek özellikle aşınma dayanımının incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve öneriler, aşağıda sıralanmıştır:

1. Daha önceki çalışmalarda da tespit edildiği gibi ÇD, YFC ve ÇUK'ün beton üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.
2. Puzolanlarda standart kıvam suyu ihtiyacı, ÇD ikame oranı artışı ile birlikte artmıştır. YFC ve ÇUK ise ikame oranı artmasına rağmen standart kıvam suyunu etkilememiştir.
3. Diyatomit, ikame oranı arttıkça gözenekli yapısı ile karışım suyunu büyük bir kısmını absorbe etmiştir.
4. Puzolan ikameli çimentoların, priz başlama, priz sona erme ve hacim genleşmeleri TS EN 197-1 standardına uygundur.
5. YFC'nun öğütülebilirliğinin ÇD'ne oranla daha zor olduğu tespit edilmiştir.
6. Üretilen betonlarda ÇDİB'da ikame oranı artışı ile işlenebilirlik düşmüş, YFCİB ve UKİB'da KB'na yakın bir işlenebilirlik elde edilmiştir.
7. Puzolanlar ile üretilen betonların birim ağırlıkları üzerine herhangi bir etkisi bulunmamaktadır.
8. Puzolanlar ile üretilen betonların hava miktarına birim ağırlıklarda olduğu gibi herhangi bir etkisi yoktur.

9. Beton basınç dayanımları % 10-% 15 ikame oranlarında KB oranla yüksektir. 180 günlük basınç dayanımları, tüm ikame oranlarında puzolanların geç dayanım kazanma özelliğine uygun olarak KB'dan daha yüksek olmuştur.
10. Üretilen betonların aşınma dayanımları basınç dayanımında olduğu gibi bir kararlılık göstermemektedir. Burada aşınmayı etkileyen numune yüzey durum, ikame oranı, puzolanın sertlik değeri etkili olmuştur.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, aşağıdaki öneriler yapılmıştır:

1. ÇD, YFC ve ÇUK, % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında ikame yöntemiyle çimento ve betonda kullanılabilir.
2. ÇD, yüksek oranda ikame edilerek akışkanlaştırıcı kullanılması veya ön nemlendirme yapılması öneril.
3. Diyatomit ile kullanılacak çimento beraber öğütülerek çimento ve beton karışımlar hazırlanabilir.
4. Karışımlarda kullanılacak puzolanları hepsinin çimento inceliğine getirilerek incelik etkisi araştırılabilir.
5. Diyatomit su oranının yüksek olduğu betonlarda ayrışmayı önlemek ve betondaki doluluğu artırmak için kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Okucu, A., “Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) yörelerindeki zeolitik ve perlitik tüflerin puzolanik özellikleri”, Doktora Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir, 1-54 (1998).
2. Uygun, A., “Dünyada Hammaddeler”, **Jeoloji Mühendisleri Odası**, Ankara, 3-4:81-83 (2003).
3. ASTM C 618, “Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete”, **ASTM**, Philadelphia (1991).
4. Aruntaş, H. Y., “Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-55 (1996).
5. Rudolf, D., “Türkiye’deki Doğal Puzolanların Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımı Üzerine İncelemeler”, **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, Ankara (1984).
6. Taşkın, C., “Türkiye Çimento Hammadde Kaynakları”, **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, Ankara, 154-160 (1983).
7. Leckebush, R., “Türkiye’deki Doğal Puzolanların Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımı”, **Çimento Araştırma ve Geliştirme Merkezi**, Ankara, 1-10 (1984).
8. TS 802, “Beton Karışım Hesap Esasları”, **TSE**, Ankara (1985).
9. Postacıoğlu, B., Beton Bağlayıcı Maddeler, Agregalar Beton, Cilt 2. **Teknik Kitaplar Yayınevi**, İstanbul (1987).
10. Şimşek O., “Yapı Malzemesi-II”, **Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi**, Ankara 45-79 (2000).
11. Postacıoğlu, B., “Beton Bağlayıcı Maddeler”, **Teknik Kitaplar Yayınevi**, İstanbul, 5-38 (1986).
12. Özden, K., “Betonarme I. Betonarmenin Malzemesi ve Kesit Hesapları”, **İ.T.Ü.**, İstanbul, 110:14-22 (1978).
13. TS EN 197-1, “Çimento Bölüm 1:Genel Çimentolar-Bileşim, Özellik ve Uygunluk Kriterleri”, **TSE**, Ankara (2002).
14. TS 3440, “Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar İçin Yapım Kuralları”, **TSE**, Ankara (1982).

15. Akman, M.S., “Yapı Malzemeleri”, *İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası*, İstanbul, 1-62 (1990).
16. Albayrak, H.F., “Sertleşmiş Çimento ve Agregası Üzerinde Don ve Çözülme Maddesinin Tesiri”, *DSİ Teknik Bülteni*, D.S.İ Genel Müdürlüğü, Ankara, 54:3-10 (1988).
17. Gani, M. S. J., “Cement and Concrete”, *Faculty of Engineering Monash University Clayton*, Victoria, Australia, 83-90 (1997).
18. Aruntaş, H. Y., Tokyay, M., “Katkılı Çimento Üretiminde Diyatomitin Puzolani Malzeme Olarak Kullanılabilirliği”, *Çimento ve Beton Dünyası*, Ankara, 4:33-41 (1996).
19. Massazza, F., “Puzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları Semineri”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara (1989).
20. Ramachandran, V. S., Beaudoin, James J., “Concrete Admixtures Handbook”, *Noyes Publication*, New Jersey, 42-47 (2001).
21. Erdoğan, T. Y., “Beton”, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü*, Ankara, 175-177 (2003).
22. Köktürk, U., “Endüstriyel Hammaddeler”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mimarlık-Mühendislik Fakültesi Dergisi*, İzmir, 205:20-27 (1991).
23. Özbey, G., Atamer, N., “Diyatomit Hakkında Bazı Bilgiler”, 10. *Türkiye Madencilik Bilimsel Teknik Kongresi*, Ankara, 493-502 (1987).
24. MTA, “Türkiye Diyatomit Envanteri”, *DSİ*, Ankara, 138:1-40 (1988).
25. Borat, M., “Türkiye Diyatomitlerinin Özellikleri ve Filtrasyon Karakteristikleri”, Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-20 (1992).
26. Baran, Y., “Ankara Kızılirmak Fabrikası Atığı Diyatomitlerin Çimento Üretiminde Puzolan Olarak Kullanılabilirliği Üzerine Bir Çalışma”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 10-38 (2003).
27. Bahadır, M. F., “Diyatomitin Yüksek Dayanımlı Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 30-49 (2001).
28. Tonak, T., Atay, Y., Ertürk, F., “Diyatomit Atıklarının Çimento Endüstrisinde Kullanılabilirliği ve Sağladığı Faydalar”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Çimento Bülteni, Ankara, 28:1-10 (1991).

29. Özden, N., “Çimento Teknolojisi”, *Türkiye Çimento Sanayii T.A.Ş.*, Ankara (1981).
30. Aktif Kizelgur Fabrikası, “Teknik Kataloğu”, *Türkiye Şeker Fab. A.Ş.*, Ankara
31. Mete, Z., “Kütahya Alayurt Yöresi Diyatomit Yataklarının İzole Tuğla Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, *Seramik Teknik Kongresi*, Ankara, 253-263 (1985).
32. TS 1114 EN 13055-1 “Hafif Agregalar-Bölüm 1: Beton, Harç ve Şerbette Kullanım İçin”, *TSE*, Ankara (2004).
33. ASTM C 330, “Lightweight Aggregates for Structural Concrete”, *ASTM*, Philadelphia (1989).
34. ASTM C 331, “Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Unites” *ASTM*, , Philadelphia (1989).
35. ASTM C 332, “Lightweight Aggregates for Insulating Concrete”, *ASTM*, Philadelphia (1987).
36. Aruntaş, H. Y., “Diyatomit Özellikleri, Kullanım Alanları ve İnşaat Sektöründeki Yeri”, *Çimento ve Beton Dünyası*, Ankara, 1:27-32 (1996).
37. TS 9773, “Diyatomit – Isı Yalıtımında Kullanılan”, *TSE*, Ankara (1992).
38. TS 11439 “Diyatomit-Aşındırıcı Olarak Kullanılan”, *TSE*, Ankara (1994).
39. TS EN ISO 3262-22 “Boyalar İçin Dolgu Maddeleri-Özellikler ve Deney Yöntemleri-Bölüm 22:Eritişli Kalsine Diyatomit (Kizelgur)”, *TSE*, Ankara (2003).
40. TS 11930 “Diyatomit-Dolgu Maddesi Olarak Kullanılan”, *TSE*, Ankara (1996).
41. Gürdal, E., “Isı İletkenlik Katsayısının Malzeme Özellikleri İle İlişkileri”, *Yapı*, Ankara, 44:80-88 (1988).
42. Erdoğan, T. Y., “Atık Malzemelerin İnşaat Sektöründe Kullanımı”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, 1-8 (1993).
43. Tokyay M., Erdoğan K., “Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, Y97-2:10-55 (2003).
44. Lea, F. M., “The Chemistry of Cement and Concrete”, *Edward Arnold Ltd.*, (1970).

45. Güler, A., “Günümüzde Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründe Kullanımı”, ***Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu***, Ankara, 215-222 (1993).
46. Ölmez, H., “Endüstriyel ve Tarımsal Atıkların Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi”, ***O.M. Ü.***, Samsun, 47:20-29 (1988).
47. Erdoğan, T. Y., “Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı”, ***Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu***, Ankara, 1-13 (1995).
48. Regourd, M., “Slags and Slag Cement”, Cement Replacement Materials (Ed. R.N. Swamy) ***Surrey University Press***, 73-99 (1986).
49. TS 10157 “Çimento-Sülfata Dayanıklı”, ***TSE***, Ankara 1992.
50. Cilason, N., Altınışık, T., Gençoglu, T., “Yüksek Fırın Cürufu ve Betonda Kullanımı”, ***Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı***, Ankara, 223-234 (1993).
51. Wainwright, P. J., “Properties of Fresh and Hardened Concrete Incorporating Slag Cements”, ***Cement Replacement Materials***, 100-133 (1986).
52. Reeves, C. M., “The Use of Ground Granulated Blast Furnace Slag to Produce Durable Concrete”, ***Durability of Concrete Conference***, Inst. of Civ. Engineers, Londra, 37-54 (1985).
53. Meusel, J. W., ve Rose, J. H., “Production of Granulated Blast Furnace Slag at Sparrows Point and the Workability and Strength Potential of Concrete Incorporating the Slag”, 1.st Int. Confr. On Fly Ash, ***Silica Furne and Slag in Concrete***, ACI, Sp. Publ., Montebello, 2:867-890 (1983).
54. TS 3787, “Beton Ayragası – Havada Soğutulmuş Yüksek Fırın Cürufundan”, ***TSE***, Ankara (1982).
55. BS 1047, “Specification for Air-cooled Blastfurnace Slag Aggregate for use in Construction”, ***İngiliz Standardı*** (1983).
56. ASTM C 595, “Standart Specification for Blended Hydraulic Cement”, ***Amerikan Standardı***, Philadelphia (1995).
57. Mnaz, O. E., “ Worldwide Production of Coal Ash Utilization in Concrete”, Porceedings of 10 th, ***International Ash Use Symposium***, Orlando, USA (1993).
58. Erdoğan, T. Y., “Srength Proties of Low-lime and High-lime Fly Ash Concretes”, ***Proceedings of Ninth International Ash Use SymPosium***, USA, 1:16-3, 12-16 (1993).

59. Erdoğan, T. Y., “Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu”, **Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması**, Ankara (1993).
60. Montgomery, D., G., “Instant-chilled steel slag aggregate in concrete-fracture related properties”, **Cement and Concrete Research**, 22: 755-760 (1992).
61. Güllü, H., “Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül İçeren Taze Beton Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, **Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Gaziantep (1996).
62. Köksal, F., “Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Külün Kaplama Betonlarının Islanma-Kuruma Direncine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Gaziantep (1996).
63. Doğulu, S., “Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cüruflarının İnceliğinin Bağlayıcı Özelliklerine ve Kullanımına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **O.D.T.Ü.İ.M.**, Ankara (1998).
64. Yaprak, H., Şimşek, O., Aruntaş, H. Y., “Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufunun Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Beton Özelliklerine Etkisi”, **Beton 2004 Kongresi**, İstanbul, 707-805 (2004).
65. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeniboğanlı, A., “Türkiye’de Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri”, **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, Ankara (2003).
66. Tokyay, M., Erdoğan, K., “Uçucu Küllerin Karakterisasyonu”, **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, Ankara (1998).
67. Spellman, L. U., “Granulated Blast Furnace Slag as a Material Admixture”, **Cencrete International**, 66-71 (1982).
68. Hewlett, P., C., “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”, **Fourth Edition**, Arnold (1998).
69. ACI Committee 226, “Use of Fly Ash in Concrete”, **ACI Materials Journal**, 84 (5):381-409 (1987).
70. Enders, M., “The CaO Distribution to Mineral Phases in a High Calcium Fly Ash From Eastern Germany”, **Cement and Concrete Research**, 15(1):185-198 (1985).
71. Bosbach, D., ve Enders, M., “Microphotography of High Calcium Fly Ash Participle Surfaces”, **Advances in Cement Research**, 10(1):17-24 (1998).

72. Ataç, A., “ Çayırhan Uçucu Külü ile üretilen Betonlarda Kr Koşullarının Beton zelliklerine Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (2001).
73. Bilim, C., “ Afşin-Elbistan Uçucu Klnn Beton İçinde Kullanılabilirliğı ve Hızlandırılmış Kr Uygulaması ”, Yüksek Lisans Tezi, **Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Antakya (2001).
74. Gökçe, A., “Farklı İnceliklerdeki Uçucu Küllerin Betondaki Performanslarının Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (1995).
75. Korkmaz, Y., “Uçucu Kül İkameli Betonlarda Deniz Suyunun Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2002).
76. Dustan. M.,R.,H., Thomas, M.,D.,A., Cripwel, J, B., and Harrison, D., J., “ Investigation into the Long Term In-Situ Performance of Hihg Fly Ash Content Concrete Used for Structural Applications”, **ACI SP- 132**, 1:1-20 (1992).
77. Uyan, M., zcan M., Yıldırım H., “Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Betonun Kılcallık ve Su Emme zelliklerine Etkisi”, **Beton ve imento Semineri**, DSİ, Ankara, 1-15 (1998).
78. Tunçbilek, B., “Bazı Türkiye Uçucu Küllerinin Portland imentosu-Uçucu Kül Hamur ve Harçlarının zelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **ODTÜ, İnşaat Mühendisliğı**, Ankara (1998).
79. Atış, C. D., “Yüksek Oranda Uçucu Kül Kullanımı ile üretilen Betonun Aşınma Direnci”, **İMO Teknik Dergi**, Ankara, 2217-2230 (2000).
80. TS 707, “Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunelerinin Hazırlanması”, **TSE**, Ankara (1980).
81. TS 3526, “Beton Agregalarında zgl Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini”, **TSE**, Ankara (1980).
82. TS 3530 EN 993-1, “Agregalarının Geometrik zellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Elleme Metodu”, **TSE**, Ankara (1999).
83. TS EN 196-2, “imento Deney Metotları – Blm2: Çimentonun Kimyasal Analizi”, **TSE**, Ankara (2002).
84. TS EN 196-1, “imento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım Tayini”, **TSE**, Ankara (2002).
85. TS EN 196-3, “imento Deney Metotları – Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini”, **TSE**, Ankara (2002).

86. TS EN 196-6, “Çimento Deney Metotları – Bölüm 6: İncelik Tayini”, *TSE*, Ankara (2002).
87. TS EN 12350-2, “ Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi”, *TSE*, Ankara (2002).
88. TS 2941 “Taze Betonda Birim Ağırlık, Verim ve Hava Miktarının Ağırlık Yöntemi ile Tayini”, *TSE*, Ankara (1978).
89. TS EN 12350-7, “Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 7: Hava İçeriğinin Tayini-Basınç Metotları”, *TSE*, Ankara (2002).
90. TS EN 12350-3, “Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 3: Vebe Deneyi”, *TSE*, Ankara (2002).
91. TS EN 12390-3 “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini”, *TSE*, Ankara (2003).
92. ASTM-C 944, “Standart Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar surfaces by the Rotating- Cutter Method”, *ASTM*, Philadelphia (1999).
93. Aruntaş, H.Y., Tokyay, M., “ Central Anatolian Diatomites For Producing Pozzolanic Cements “ 1st International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, *Turkish Cement Manufacturers Association*, İstanbul, 193-197 (1997).

ÖZGEÇMİŞ

14.04.1978`de Ankara`da dünyaya geldi. İlk ve orta öğrenimini tamamlayıp. Lise öğrenimini Ankara İnşaat Teknik Lisesinde tamamladı. 1997`de Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü`nde öğrenime başladı. 2001 yılında Yapı Eğitimi Bölümünden mezun oldu. 2002 yılı güz döneminde Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Özel bir beton laboratuvarında 2002 ve 2005 yıllarında çalışmıştır. Halen Cersoy Hazır Beton Fabrikasında çalışmaktadır. Vatani görevini Erzurum`da yapmıştır.