



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PUZOLANLARIN PUZOLANİK AKTİVİTELERİNİN ÇİMENTO
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Duygu EREN

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Fahriye M. KILINÇKALE**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2018

Bu çalışma, 14.01.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliğı Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Fahriye M. KILINÇKALE(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Turhan BİLİR
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Özgür ÇAKIR
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Lisans ve lisansüstü öğrenim hayatımın, hem de bu tez çalışmamın her evresinde yakın ilgi ve desteğini gördüğüm değerli danışman hocam Prof. Dr. Fahriye M. KILINÇKALE'ye,

Bilgi ve görüşlerinden yararlandığım değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Sezar GÜLBAZ'a,

Gerek malzeme temini, gerekse deneyler aşamasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen, başta AR-GE Yöneticisi Yasin ENGİN, Kalite Kontrol Şefi Teoman ERENOĞLU ve Kalite Kontrol Mühendisi Büşra ÇINAR olmak üzere, bütün AKÇANSA Büyükçekmece Fabrikası çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Aralık 2018

Duygu EREN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	ivv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vviii
TABLO LİSTESİ.....	viviii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. PUZOLANLAR.....	3
2.1.1. Puzolanların Sınıflandırılması	5
2.1.1.1. Doğal Puzolanlar.....	5
2.1.1.2. Yapay Puzolanlar	6
2.1.2. Puzolanik Reaksiyon	10
2.1.3. Puzolanik Aktivite	10
2.1.4. Puzolanik Aktiviteyi Belirleyen Etkenler	12
2.1.4.1. Atom Yapısı	12
2.1.4.2. Kimyasal Bileşim	13
2.1.4.3. Kalsinasyon	13
2.1.4.4. Aktivasyon	14
2.1.5. Puzolanik Aktivitenin Değerlendirilmesinde Kullanılan Yöntemler.....	15
2.1.5.1. Kimyasal Yöntem	15
2.1.5.2. Fiziksel Yöntem	16
2.1.5.3. Mekanik Yöntem.....	16
2.1.5.4. Mikro Yapısal Yöntem	16
2.2. ÇİMENTO.....	17
2.2.1. Çimento Türleri.....	17
2.2.2. Portland Çimentosu	17
2.2.3. Çimento Özellikleri	19
2.2.3.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikler.....	19

2.2.3.2. <i>Kimyasal Özellikler</i>	20
2.2.4. Hidratasyon Isısı.....	22
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	24
3.1. MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ.....	24
3.1.1. Kum.....	24
3.1.2. Çimento.....	24
3.1.3. Puzolanlar.....	24
3.2. HARÇ KARIŞIM ORANLARI VE NUMUNELERİN KODLANMASI.....	28
3.3. YAPILAN DENEYLER.....	33
3.3.1. Puzolanik Aktivite Deneyi.....	33
3.3.2. Puzolanik Özellik Deneyi.....	34
3.3.3. Hidratasyon Isısı Ölçümü.....	36
3.3.4. Birim Ağırlık Deneyi.....	36
3.3.5. Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyleri.....	36
4. BULGULAR.....	39
4.1. FİZİKSEL VE KİMYASAL ANALİZ SONUÇLARI.....	39
4.1.1. Puzolanlar.....	39
4.1.2. Çimento.....	41
4.1.3. Harçlar.....	41
4.2. DENEY SONUÇLARI.....	43
4.2.1. Puzolanik Aktivite Deneyi.....	43
4.2.2. Puzolanik Özellik Deneyi.....	44
4.2.3. Hidratasyon Isısı Ölçümü.....	45
4.2.4. Birim Ağırlık Deneyi.....	47
4.2.5. Basınç Dayanımı Deneyi.....	49
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	55
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Puzolanların sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.2. TS EN 197-1'e göre çimento çeşitleri.....	18
Şekil 3.1. Çimento granülometrisi.....	24
Şekil 3.2. Puzolanların granülometrisi.....	26
Şekil 3.2. Puzolanların granülometrisi (devamı)	27
Şekil 3.3. Harçların granülometrisi.....	30
Şekil 3.3. Harçların granülometrisi (devamı)	31
Şekil 3.4. Puzolanik özelliğın tayini için kullanılan grafik.....	35
Şekil 3.5. Eğilme dayanımı yükleme düzeneği	37
Şekil 3.6. Basınç dayanımı yükleme düzeneği.....	38
Şekil 4.1. Puzolanik aktivite deney sonuçları	43
Şekil 4.2. Puzolanik özellik deneyi sonuçları	45
Şekil 4.3. Birim ağırlık deneyi sonuçları	48
Şekil 4.4. Ortalama basınç dayanımı deneyi sonuçları.....	51
Şekil 4.5. Tras ikameli harç numunelerinin basınç dayanımı değişimleri.....	52
Şekil 4.6. Uçucu kül ikameli harç numunelerinin basınç dayanımı değişimleri.....	53
Şekil 4.7. Yüksek fırın cürufu ikameli harç numunelerinin basınç dayanımı değişimleri	53

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. TS 25'e göre doğal puzolanların sahip olması gereken kimyasal özellikler.....	12
Tablo 2.2. Mielenz ve diğer araştırmacılara göre puzolan sınıfları	14
Tablo 2.3. Tipik bir Portland çimentosunda bulunan bileşenlerin oranları	17
Tablo 2.4. Portland çimentosu ana bileşenlerinin özellikleri	18
Tablo 2.5. Karakteristik değerlerle verilen mekanik ve fiziksel özellikler	20
Tablo 2.6. Karakteristik değerlerle verilen kimyasal özellikler.....	21
Tablo 3.1. Çimento ve puzolanlara ait kimyasal özellikler	25
Tablo 3.2. Puzolanların kimyasal özellikleri	26
Tablo 3.3. Harç numunelerinin kodları	28
Tablo 3.4. Harçların fiziksel özellikleri.....	29
Tablo 3.5. Harçların kimyasal özellikleri	32
Tablo 3.6. Puzolanik aktivite deneyi için kullanılacak malzeme miktarları	33
Tablo 3.7. Numune hazırlamak için kullanılan malzeme miktarları.....	34
Tablo 3.8. Sertleşmiş harç numunelerinin ölçülen ağırlıkları.....	36
Tablo 4.1. Puzolanik özellik deney sonuçları	44
Tablo 4.2. Hidratasyon ısı ölçüm sonuçları	46
Tablo 4.3. Birim ağırlık deneyi sonuçları.....	48
Tablo 4.4. 2 günlük basınç dayanımı değerleri.....	49
Tablo 4.5. 7 günlük basınç dayanımı değerleri.....	49
Tablo 4.6. 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	50
Tablo 4.7. 56 günlük basınç dayanımı değerleri.....	50
Tablo 4.8. Ortalama basınç dayanımı değerleri	51

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
SiO₂	: Silisyum dioksit
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
Fe₂O₃	: Demir oksit
Ca(OH)₂	: Kalsiyum hidroksit
C₃S	: Tri kalsiyum silikat
C₂S	: Di kalsiyum silikat
C₃A	: Tri kalsiyum alüminat
C₄AF	: Tetra kalsiyum alüminoferrit

Kısaltmalar	Açıklama
PÇ	: Portland çimentosu
LT	: Ladik trası
ŞT	: Şile trası
İU	: İçdaş uçucu külü
TU	: Tunçbilek uçucu külü
OC	: Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu
KC	: Karçimsa yüksek fırın cürufu
R	: Şahit harç numunesi
T1	: Ladik trası ikameli harç numunesi
T2	: Şile trası ikameli harç numunesi
U1	: İçdaş uçucu külü ikameli harç numunesi
U2	: Tunçbilek uçucu külü ikameli harç numunesi
C1	: Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu ikameli harç numunesi
C2	: Karçimsa yüksek fırın cürufu ikameli harç numunesi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PUZOLANLARIN PUZOLANİK AKTİVİTELERİNİN ÇİMENTO ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Duygu EREN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Fahriye M. KILINÇKALE

Yapı sektöründe en çok tercih edilen malzeme beton, betonun da en önemli bileşeni çimentodur. Çimentonun yüksek maliyete sahip olması ve çevreye olan olumsuz etkileri sebebiyle, çimento yerine farklı malzemeler kullanılmaktadır. Puzolanlar, betonun birçok özelliğini olumlu yönde değiştirdikleri, portland çimentosundan daha ekonomik oldukları ve beton bileşiminde yüksek oranlarda kullanılabilirler için, çimentoya alternatif olarak kullanılan malzemelerin başında yer almaktadır.

Bu çalışmada kullanılan puzolanik malzemeler tras, uçucu kül ve yüksek fırın cürufudur. İlgili standartlara göre yapılan deneylerle ilk önce puzolanların puzolanik aktiviteleri belirlenmiştir. Daha sonra çimento yerine ağırlıkça %20 oranında puzolan ikame edilerek harçlar üretilmiş, ve ilgili standartlara göre yapılan deneylerle, numune harçların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Puzolan katkılı harçlar ile katkısız çimento harcının özellikleri karşılaştırılarak, puzolanik aktivitenin çimento özellikleri üzerindeki etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Aralık 2018, 76 sayfa.

Anahtar kelimeler: Puzolan, çimento, puzolanik aktivite.

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF POZZOLANIC ACTIVITIES OF POZZOLANS ON CEMENT PROPERTIES

Duygu EREN

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Fahriye M. KILINCKALE

The most preferred material in the construction sector is concrete and the most important component of concrete is cement. Because of the high cost of cement and its negative effects on the environment, different materials are used instead of cement. Pozzolans are among the materials used as an alternative to cement since they change the many properties of the concrete in a positive way, they are more economical than portland cement and they can be used at high rates in the concrete composition.

The pozzolans used in this study are trass, fly ash and blast furnace slag. The pozzolanic activities of the pozzolans were firstly determined by the experiments performed according to the relevant standards. Then, instead of cement, mortars were produced by replacing 20% by weight of pozzolan, and by the tests carried out according to the relevant standards, the chemical, physical and mechanical properties of the sample mortars were determined. By comparing the properties of cement mortar with pozzolan admixtures, the effects of pozzolanic activity on cement properties were tried to be demonstrated.

December 2018, 76 pages.

Keywords: Pozzolan, cement, pozzolanic activity.

1. GİRİŞ

Dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de en önemli sorunların başında, nüfusun artması ve teknolojinin gelişmesi kaynaklı, enerji tüketiminde ve çevre kirliliğinde yaşanan artış gelmektedir. Nüfus artışı barınma ihtiyacını doğurmakta, çevre ve insan sağlığının gözetilmesi gereği de yapı sektörünü alternatif malzeme arayışına sokmaktadır. Bu gerekler neticesinde, günümüz yapı sektöründe sürdürülebilir yapı malzemelerinin kullanımı çok önemli bir hal almıştır.

Sürdürülebilir yapı malzemeleri, kullanım ömürleri süresince enerji tüketimleri minimum seviyede olan, hammaddeden atığa kadarki süreçte çevre ve insan sağlığı bakımından zararsız kabul edilen malzemelerdir[1].

Hem ülkemizde hem de dünyada, yapı sektöründe en yaygın kullanıma sahip olan malzeme betondur. Betonun en önemli bileşeni ise çimentodur. Çimentonun yüksek maliyeti ve çevreye olan olumsuz etkileri sebebiyle, çimentoya ikame edilecek malzeme arayışı doğmuştur.

Puzolanlar, beton özelliklerine olumlu yönde katkı yapmaları, portland çimentosundan daha ucuz olmaları ve beton karışımı içerisinde çimentonun yerine ağırlıkça çok yüksek oranlarda ikame edilebilmeleri nedeniyle, çimentoya alternatif olarak kullanılan malzemelerin başında yer almaktadır. Yapılarında yüksek miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içeren puzolanların $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile tepkimeleri kolaydır. Bu tepkime sonucunda da hidrolik bağlayıcı özellik gösterirler[2].

Puzolanlar, genellikle oluşum şekillerine sınıflandırılır, doğal puzolanlar ve yapay puzolanlar olarak iki sınıfa ayrılır. Ülkemizdeki çimento sanayiinde, doğal puzolanlar olarak tras, yapay puzolanlar olarak da yüksek fırın cürufu ve uçucu kül en çok tercih edilen malzemelerdir.

Bu çalışmada kullanılan puzolanlar tras, yüksek fırın cürufu ve uçucu küldür. Her bir puzolandan iki farklı çeşit olmak üzere toplam altı çeşit puzolanla çalışılmıştır. Puzolanların fiziksel ve kimyasal özellikleri yapılan analizlerle belirlenmiştir. Standartlara göre yapılan puzolanik aktivite ve puzolanik özellik testleriyle de puzolanlar arasında karşılaştırma

yapılmıştır. Çimentoya ağırlıkça %20 oranında puzolan ikame edilerek harç üretimi yapılmıştır. Puzolan katkılı numune harçların ve %100 çimento ile üretilen şahit numunenin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri analiz edilmiş, şahit numuneye göre söz konusu özelliklerdeki değişiklikler incelenmiştir. Puzolanların puzolanik aktivite değerleri de incelemeye katılarak, puzolanik aktivitenin çimento özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.



2. GENEL KISIMLAR

2.1. PUZOLANLAR

Puzolanlar, tek halde bağlayıcılık özelliğine sahip olmayan veya çok düşük oranda bağlayıcılık özelliği gösteren, ancak çok ince taneli öğütülmüş haldeyken, su bulunan ortamda ve normal çevre sıcaklığında çözülmüş kalsiyum hidroksit ile birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine kavuşan silika ve alümina içerikli malzemelerdir[3-12].

Puzolan ilk defa milattan yaklaşık 100 yıl önce, eski Romalılar tarafından, Napoli yakınlarındaki Pozzuoli kasabası civarında elde edilmiştir. Vezüv yanardağı yakınlarında bulunan bu toprak camlaşmış volkan toprağı olup, günümüzde kullanılan “Puzolan” sözcüğü de kasabanın isminden kaynaklanmaktadır. Günümüzde, ince taneli haldeyken söndürülmüş kireç ve su ile birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan silisli ve alüminli malzemelerin tümü puzolan ismi ile anılmaktadır[13,15].

Puzolanlar esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)’den oluşmuş olup, geri kalan kısım ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri içermektedir. Reaktif SiO_2 miktarı kütlece %25’ den az olmamalıdır.

Puzolanların istenilen düzeyde bağlayıcılık özelliği gösterebilmeleri için[4]:

- İçeriğindeki silika ve alümina miktarının yüksek olması,
- Amorf yapıda olması,
- Saf haldeyken taneciklerinin çok ince yapıda olması, veya öğütülerek minimum çimento tanecikleri kadar ince hale getirilmiş olması gerekmektedir.

İnsanoğlunun su içinde priz yapabilme özelliğine sahip ve su etkisi ile kaybolmayan bağlayıcı madde üretme çalışmaları çok eski zamanlara dayanmaktadır. Bu çabaların kati çözümü ise çimentonun icat edilmesi ile mümkün olmuştur. Bunun yanı sıra aktif ve camlaşmış silis (SiO_2) içeren toprakların kireçle karıştırılmaları halinde de bu özelliğin nispeten sağlandığı görülmüştür[17].

Ülkemizde, Çatalhöyük'te bulunan tarihi yapılar üzerinde yapılan bilimsel araştırma ve gözlemlerde, söz konusu yapılarda kullanılmış harcın yaklaşık 8000 yıllık olduğu ortaya çıkarılmıştır. İlk başlarda, söz konusu harcın kireç ve alçıdan yapıldığı düşünülmüştür. Ancak, yalnızca kireç ve alçı kullanılarak elde edilen bağlayıcılar özellikle de sulu ortamlarda dayanıklılık gösteremezler. Dolayısıyla bu bağlayıcılarla üretilmiş harçların günümüze kadar gelen süreçte dayanıklılık göstermeleri mümkün gözükmemektedir. Bu nedenle, yaklaşık 8000 yıl öncesine ait bu harcın yapımında puzolanların kullanılmış olabileceği çok yüksek bir ihtimaldir. Puzolanik malzemelerin ilk defa Romalılar tarafından bulunup kullanıldığı varsayılıyor olsa da, araştırma sonuçları Romalılardan çok uzun yıllar önce de, bu malzemelerin insanoğlu tarafından bir şekilde kullanım imkanı bulunduğunu göstermektedir[15].

Öğütülmüş tuğla, yani pişirilmiş kil ve kirecin su ile karıştırılması ile oluşturulan bağlayıcı özellikli malzemeler de eski çağlarda kullanılmıştır. Söz konusu malzemelerden üretilen harçlar, çeşitli diyarlarda çeşitli isimler almıştır. Örneğin, Hindistan'da "surkhi", Mısır'da "homra" ismiyle anılan bu harç, Osmanlılar Devleti döneminde, Türkler tarafından inşa edilen yapılarda da kullanılmış ve "horasan harcı" olarak adlandırılmıştır[14].

Puzolanlar, doğal olarak oluşan, başlıca volkanik kaynaklı malzemeleri ve oluşumları yapay olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. malzemeleri kapsamaktadır[16]. Puzolanlar buldukları bölgelere göre özel isimler almışlardır. Örneğin, Almanya'da, "Tras", Yunanistan'da "Santorin toprağı" olarak bilinmektedirler. Ülkemizde ise volkanik kaynaklı puzolanlara genel olarak tras denilmektedir.

Ülkemiz tras yönünden zengin topraklara sahiptir. Özellikle İç Anadolu, Ege, Marmara, Karadeniz ve Akdeniz Bölgesi çok sayıda tras kaynağının bulunduğu yerlerdir. Ülkemizin jeoloji haritası dikkate alındığında, volkanik kayaç oluşumlarının varlığını gösteren alanın Türkiye yüz ölçümünün aşağı yukarı 1/5'i kadarı olduğu görülebilir.

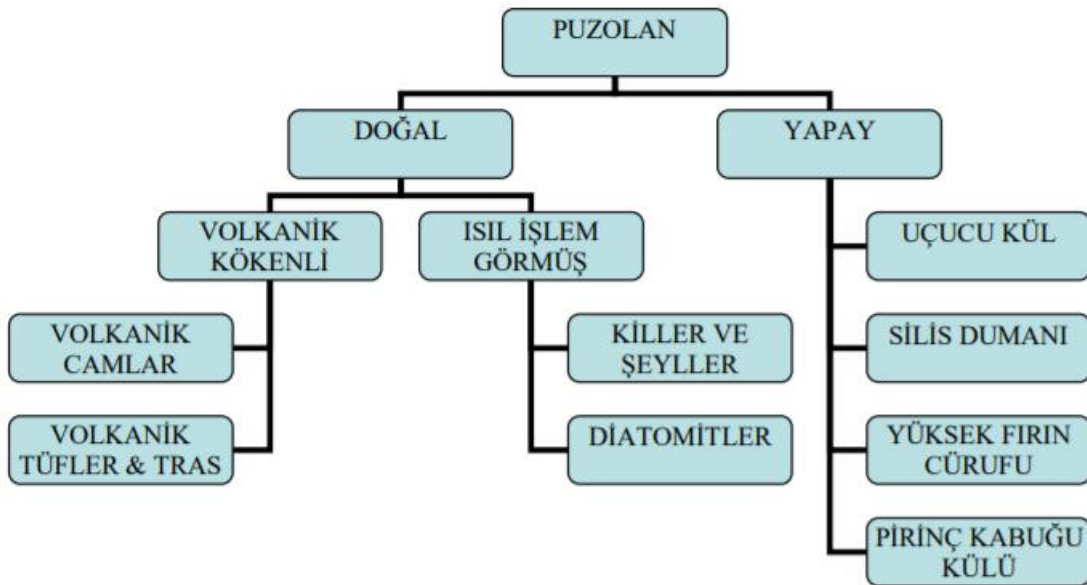
Ülkemizde, üretilen çimentolarda kullanılan tras miktarı yıldan yıla artış göstermiştir. 1985 yılından 1990 yılına kadar üretimi yapılan çimentoların %14,6'lık kısmında tras kullanılmışken, bu değer 1992 - 1994 yılları arasında %36,31'e yükselmiştir.

19. yüzyılın sonlarına doğru Portland Çimentosu keşfedilmiş, bu keşifle beraber de puzolanik çimentonun kullanımı azalmıştır. Ülkemizde, 1950 yılından itibaren Portland Çimentosu ve

puzolanik maddeler birlikte kullanılmaya başlanmıştır. Portland çimentosu ve puzolan kombinasyonu ile hazırlanan beton ve harçların bağlayıcılık özellikleri incelendiğinde iyi yönde değişiklikler gösterdiği saptanmıştır. Bunun sonucunda da puzolanların çimento malzemesi olarak kullanılması kabul görmüştür[18].

2.1.1. Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanlar, genellikle oluşum şekillerine göre sınıflandırılır, “doğal puzolanlar” ve “yapay puzolanlar” olmak üzere iki sınıfta ele alınırlar. Oluşum şekillerine göre puzolan sınıfları Şekil 2.1.’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Puzolanların sınıflandırılması[11].

2.1.1.1. Doğal Puzolanlar

Adından da anlaşılacağı üzere doğal puzolanlar, yerküre üzerinde doğal halde bulunan ve puzolanik özellik gösteren malzemelerdir. Ülkemizde “tras” olarak adlandırılan bu grup içerisinde volkanik tüfler, volkanik camlar, ısıl işlem görmüş killer ve şeyller ile diatomitler yer almaktadır[21,26,29].

Şekil 2.1.’de verilen sınıflandırmaya göre doğal puzolanlar, volkanik kökenli ve ısıl işlem görmüş doğal puzolanlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Volkanik camlar, volkanik tüfler ve trasın oluşturduğu volkanik kökenli doğal puzolanlar, eriyen magmanın püskürmesi sonucu oluşan malzemelerdir. Magmanın püskürme hızı puzolanın cinsini belirlemektedir. Hızlı püskürme

sonucu puzolanik aktivitesi yüksek volkanik camlar oluşurken, daha yavaş püskürmeler sonucunda da volkanik küller meydana gelmektedir[13].

Isıl işlem görmüş doğal puzolanlar sınıfında yer alan killer ve şeyller hammadde formundayken kristal yapıdadırlar, dolayısıyla puzolanik özellik göstermezler. Puzolanik özellik kazanabilmeleri için ısıl işleme tabi tutulurlar. En yaygın olarak kullanılan yöntem, döner fırınlarda, 700°C - 900°C arasındaki sıcaklıkta, 1 saat ile 2 saat arasında uygulanan ısıl işlemdir. Bu işlem sonunda kalsine olarak kristal yapıları bozulan kil mineralleri puzolanik özellik kazanmış olurlar. Pişmiş killer, tuğla ve fayans atıklarının çok ince öğütülmesiyle de elde edilirler. Bu şekilde üretilen killerin puzolanik aktiviteleri değişken karakter göstermektedir[13].

Diatomitler, bir su bitkisi olan diatomların kalıntılarıdır. Bu kalıntılar toprakta bulunduğu için, sınıflandırmada bu gruba diatomlu topraklar da denilebilir. Söz konusu bu organik kalıntılar çok yüksek oranda silis içermektedirler. Diatomitlerin puzolanik aktivitesi, içerdikleri amorf silis miktarına bağlı olarak değişmektedir. Bünyesinde yüksek oranda kil minerali içeren diatomitlerin puzolanik aktivitesi düşüktür. Killi diatomitlerin puzolanik aktivitelerini arttırmak için, 760°C - 1000°C arasındaki sıcaklıklarda ısıl işlem uygulanması gerekir[13].

2.1.1.2. Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar aslında puzolanik özelliğe sahip atık malzemelerdir. Bu grup içerisinde en çok kullanılan malzemeler olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı, endüstriyel bir üretim sonucu ortaya çıkarlar. Özellikle Asya kıtasında geniş kullanım olanağı bulan buğday sapı külü ile pirinç kabuğu külü ise, hasatı yapılan buğday ve pirincin atık kabuklarından elde edilmektedirler[21,26,29].

Yapı sektöründe en çok kullanılan puzolanik malzemeler olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve pirinç kabuğu külünün oluşma şekilleri, özellikleri, ve kullanım alanlarına ait bilgiler aşağıdaki paragraflarda detaylı olarak açıklanmaya çalışılmıştır.

Uçucu kül: Pulverize kömür, termik santrallerde, elektrik enerjisi üretiminde yakıt olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül diye adlandırdığımız yapay puzolan, pulverize kömürün yakılması sonucu açığa çıkan bir üründür. Tanecik boyutları 1 µm - 150 µm arasındadır, amorf yapıya

sahiptir, bünyesinde çok yüksek oranlarda silika ve alümina içermektedir [4,6,8,12,19,22,24,27,30].

Uçucu küllerin çimento ve beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak kullanılabilmesine dair ilk çalışma, 1932 yılında, Kaliforniya Üniversitesi'nde yapılmıştır. R. E. Davis, R. W. Carlson, J. W. Kelley ve H. E. Davis tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, çimento yerine değişik oranlarda uçucu kül ikame edilerek beton üretimi yapılmış ve üretilen betonların özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda yapılan açıklamada, uçucu külün %30 - %50 oranlarında çimentoya ikame edilmesi halinde de istenen özelliklerde beton üretiminin yapılabileceği belirtilmiştir[25].

1937 yılı itibariyle beton üretiminde kullanılmaya başlanan uçucu küller, her çeşit beton üretiminde kullanılabilmeyle beraber, en çok kütle betonu üretiminde tercih edilmektedir. Betonun hidratasyon ısını düşüren bir mineral katkı olan uçucu kül, bu özelliği sebebiyle kütle betonları için çok önemlidir.

1948 yılında ABD-Montana bölgesinde hayata geçirilen Hungry Horse Barajı projesi, beton üretiminde uçucu kül kullanılan ilk büyük projedir. Söz konusu projede, portland çimentosu yerine, ağırlıkça %32,4 oranında uçucu kül ikame edilmiştir[25]. 1960 yılı itibariyle üretilen barajların çoğunda da uçucu küllü beton kullanıldığı görülmüştür.

Yüksek fırın cürufu: Ham demir üretimi sırasında açığa çıkan bir atık malzeme olan yüksek fırın cürufu, demir filiz gangi, kok ve kireç taşının yanması sonucu oluşmaktadır. Ham demir üretimi yüksek fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Oluşan yüksek fırın cürufu, söz konusu fırınlarda, hafifliğinden dolayı ham demirin üzerinde yer almaktadır[28].

Ergimiş halde bulunan cürufun hızlı bir şekilde soğutulması ile granüle yüksek fırın cürufu elde edilir. Granüle yüksek fırın cürufunun kütlece en az %67'sini, bileşenlerinden kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO) ve silisyum dioksit (SiO₂)'in toplamı oluşturmaktadır. Ayrıca, kütlece (CaO+MgO)/(SiO₂) oranının da 1'den fazla olması gerekmektedir.

1774 yılında, Lariot isimli bilim adamı tarafından yapılan çalışmalar, öğütülmüş haldeki granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özelliğe sahip bir malzeme olduğunu göstermiştir. 1862 yılında, Emil Langen isimli bilim adamının yaptığı çalışmalarla da yüksek fırın cüruflarının hidrolik bağlayıcılık özelliği ortaya çıkarılmıştır. Portland yüksek fırın cürufu

çimentosu ilk defa 1892 yılında üretilmeye başlanmıştır. Bu çimentonun üretiminde, portland çimentosu klinkeri ile granüle yüksek fırın cürufu birlikte öğütülmektedir[33-34].

Çimento ve beton sektöründe çok farklı kullanım alanlarına sahip olan cüruflar, elde edilmiş şekillerine göre iki türdürler. Çeliğin geleneksel metotlarla üretilmesi sonucunda elde edilen cüruflar kristal yapıya sahiptirler. Bu tür cüruflar puzolanik özellik göstermezler, dolayısıyla sadece dolgu malzemesi olarak kullanılabilirler. Modern metotlarla yapılan çelik üretimi sonucu elde edilen cüruflar ise amorf yapıya sahiptirler, dolayısıyla bu tür cürufların çimentolu sistemlerde kullanılması uygundur. Cüruflar arasında en çok kullanım alanı bulan tür yüksek fırın cürufudur[17].

Günümüzde ABD, Kanada, Japonya ve diğer birçok ülkede, elde edilen granüle yüksek fırın cüruflarının hemen hemen tamamı, çimento üretiminde kullanılmaktan ziyade, beton üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadırlar.

Granüle yüksek fırın cürufunun çimento ile birlikte öğütülmesi sonucunda cürüflü çimento elde edilmektedir. Cürüflü çimento kullanılarak üretilmiş beton ile cürufun katkı malzemesi olarak kullanılması sonucu üretilmiş beton kıyaslandığında, katkı malzemesi olarak kullanılan cürufun daha fazla avantaj sağladığı görülmüştür. Söz konusu avantajların en önemlileri aşağıdaki paragraflarda açıklanmaya çalışılmıştır[6, 12, 31, 33].

Granüle yüksek fırın cürufu ne kadar ince öğütülürse, puzolanik özelliği de o kadar fazla olur. Beton katkı malzemesi olarak kullanılmak istenen cüruf, tek başına öğütüldüğünde istenilen inceliğe kavuşabilir. Ancak, cürüflü çimento üretmek amacıyla çimento ile cürufun birlikte öğütülmesi halinde, granüle yüksek fırın cürufunun portland çimentosu klinkerine oranla daha sert bir yapıya sahip olması nedeniyle, cüruf taneciklerini klinker kadar inceltmek mümkün olamamaktadır. Dolayısıyla, ayrı öğütmeye tabi tutulan cüruftan alınan verimin, çimento ile birlikte öğütülen cüruftan alınan verimden daha fazla olacağı söylenebilir.

Bütün çimento türleri havadaki nem ile karşı karşıya kaldıklarında prehidratasyon geçirirler. Bu durum çimentonun bağlayıcılık özelliğini kötü yönde etkilemektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunda ise prehidratasyon söz konusu değildir. Dolayısıyla, depolama şartları düşünüldüğünde, cürufun çimentoya göre daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Cürüflu çimento üretiminde, cürufun çimentoya ne oranda katılacağı belli bir standarda bağlanmıştır, ve bu oran değişmez. Dolayısıyla, cürüflu çimento ile üretilecek betonun özelliklerine cürufun etkisi de belli bir oranda olacak, bu oranı arttırmak ya da azaltmak mümkün olmayacaktır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun betona katkı malzemesi olarak eklenmesi halinde ise sınırlayıcı bir oran bulunmamaktadır. Dolayısıyla, istenilen özellikteki betonun üretilebilmesi için, istenilen oranda cüruf katkısı betona eklenebilmektedir.

Silis dumanı: Yüksek saflıktaki kuvarsın, 2000°C'ye yakın sıcaklıklarda gerçekleşen indirgenme tepkimesi sırasında SiO gazı açığa çıkmaktadır. SiO gazının havayla teması neticesinde hızlı bir şekilde yoğunlaşması, SiO₂ oluşumuna neden olmaktadır. Meydana gelen SiO₂ amorf yapıdadır ve içeriğinde çok yüksek oranda silika bulunmaktadır. Silis dumanı adı verilen bu malzeme, silikon veya silikon metalli alaşımların elde edilme reaksiyonu sırasında açığa çıkan atık bir üründür[15, 38, 40].

Amorf yapısı, içeriğinde %85-98 oranında silika içermesi ve tanecik boyutlarının çimento taneciklerine oranla kat ve kat daha küçük olması sebebiyle, silis dumanının puzolanik aktivitesi çok yüksektir. Silis dumanı çimento imalatında kullanılabildiği gibi, beton üretiminde de mineral katkı olarak kullanılabilen bir malzemedir[6, 38, 40, 43].

İlk kez 1950 yılında Norveç Teknoloji Enstitüsü'nde yapılan ve olumlu sonuçlanan araştırmayla, silis dumanının beton katkı malzemesi olarak kullanılabilir özellikte olduğu kanıtlanmıştır. Bu araştırma sonrası, silis dumanının beton katkı malzemesi olarak kullanıldığı ilk proje, Oslo Blindtarmen Tüneli projesidir. Bu proje betonlarındaki silis dumanı oranı yaklaşık %15'tir[43].

Pirinç kabuğu külü: Ülkemizde de tarımı yapılan bir bakliyat olan pirincin üretim sonu atığı olan pirinç kabuklarının yakılması sonucu elde edilen pirinç kabuğu külü, soğutulma hızına göre iki farklı yapıya sahip olur. Yavaş soğutma sonucu kristal, hızlı soğutma sonucunda amorf yapılu pirinç kabuğu külü meydana gelir. Yüksek özgül yüzey değeri ve yüksek puzolanik aktivitesi ile, çimento ve beton sektöründe kullanılan pirinç kabuğu külü amorf yapılu olmaktadır[32].

Dünya'da, buğdaydan sonra en çok üretimi yapılan tahıl çeltik, yani pirinçtir. Hasatı yapılan çeltiğin fabrikalarda işlenmesi sonucu, toplam miktarın yaklaşık %20'si kadar kavuz, yani

kabuk açığa çıkar[45]. Söz konusu kabuklar amorf yapıdadır ve içeriğinde silis bulunmaktadır[32].

Beton üretiminde mineral katkı malzemesi olarak kullanılan pirinç kabuğu külünün yapısında yüksek oranda silika bulunmaktadır. Kavuzun, yaklaşık 400°C - 600°C'de yakılması ve oluşan külün hızlı bir şekilde soğutulması sonucu elde edilen ürün, amorf silika içerikli pirinç kabuğu külüdür. İçeriğinde çok yüksek oranlara amorf silika bulunması, pirinç kabuğu külünü puzolanik aktivitesi çok yüksek bir malzeme haline getirmiştir.

Pirinç kabuğu külünün yapı sektöründe kullanımı çok eskiye dayanmakla birlikte, pirinç kabuğu külü kullanılarak üretilen ilk malzemeler tuğlalar ve kerpiç bloklardır. Pirinç kabuğu külünün beton katkı malzemesi olarak kullanımına ilişkin, 1924 yılında Almanya'da alınmış iki patent mevcuttur. 1950'li yıllarda ise, Pakistan'da, değişik çimento/kül oranları kullanılarak, portland çimentolu blok üretimleri yapılmıştır[46].

2.1.2. Puzolanik Reaksiyon

Puzolanların yapısında yüksek oranda silis ve alümin bulunur. İnce taneli öğütülmüş puzolanların, söndürülmüş kireç ve su ile bir araya gelmesi sonucunda bazı kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Söz konusu reaksiyonlar sonucunda ise, hidrolik bağlayıcılık özelliği bulunan kalsiyum-silika-hidrat jelleri (C-S-H) oluşmaktadır. Nemli ortamda gerçekleşen bu reaksiyon aşağıda verilmiştir[15].



Burada, C=CaO , H=H₂O , S=SiO₂'dir.

2.1.3. Puzolanik Aktivite

Puzolanlar, tek halde bağlayıcılık özelliği göstermeyen veya çok az bağlayıcılık özelliğine sahip , ancak ince taneli öğütülmüş haldeyken, su bulunan ortamda ve normal çevre sıcaklığında çözülmüş kalsiyum hidroksitle reaksiyonu sonucu hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan silikalı ve alüminalı malzemelerdir[3-12]. Puzolanik malzemelerin, meydana gelen bu reaksiyondaki etkinliğinin ve reaksiyon sonucunda kazandıkları bağlayıcılık özelliğinin ölçütü "puzolanik aktivite"lerini belirtmektedir. Puzolanların, istenilen puzolanik aktiviteye sahip olması, amorf

yapıda olmasına, içeriğinde bulunan silis, alümin ve demir oksit toplamının optimum miktarda olmasına, ve taneciklerinin gereğince ince taneli öğütülmüş olmasına bağlıdır.

Puzolanların puzolanik aktiviteleri belirlenirken, dayanım aktivite indeksi değerinin hesaplanması gerekir. Bu değer, puzolan katkılı harç numunesine ait ortalama basınç mukavemetinin kontrol harç numunesinin ortalama basınç mukavemetine oranının yüzde olarak ifadesidir[15].

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (2.1.)$$

Burada; A: Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç mukavemeti,

B: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç mukavemetidir.

Dayanım aktivite indeksinin hesaplanması için üretimi yapılan harç numunelerinde kullanılacak malzeme miktarları ve basınç dayanımı ölçümü için deneylerin nasıl yapılacağı konusunda ASTM C 311 ve TS EN 450-1 standartları baz alınmaktadır.

Puzolanik malzemenin istenilen özellikleri sağlayabilmesi için, dayanım aktivite indeksi değerinin, ASTM C 618'e göre minimum %75, TS 25'e göre ise minimum %70 olması gerekmektedir.

Massazza, F. puzolanik aktiviteyi, su bulunan ortamda Ca(OH)_2 ile reaksiyona girme ve sertleşme kapasitesi olarak tanımlamıştır. Bir malzeme için puzolanik aktiviteye sahiptir diyebilmek, reaksiyona girme ve sertleşme öğelerinin aynı zamanda meydana gelmesine bağlıdır[41].

Puzolanik özellik gösteren malzemelerin puzolanik aktivitelerinin nelere bağlı olduğuna dair birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, yüksek puzolanik aktivite değerine sahip olan puzolanların yapılarında yüksek oranda SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve alkali bulunduğu, camsı faz miktarının fazla olduğu ve özgül yüzeylerinin büyük olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir.

Puzolanik aktivite deneyleri, bir malzemenin puzolan olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılır. Birçok şekilde yapılabilen bu deneylerde olumlu sonuç veren malzeme puzolandır. Mekanik deneylerde, puzolanlı harçların mukavemetleri ölçülür. Kimyasal deneylerde ise,

puzolanlı çimento çözeltisindeki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı saptanır. Spektrofotometrik ve kalorimetrik metotlar kullanılarak da puzolanik aktivite tespit edilebilir. Bu yöntemlerin dışında, özgül yüzey artış hızı ölçülerek de puzolanik aktivite değerlendirilmesi yapılabilir[41].

Puzolanlar hakkında bir genelleme yapılacak olursa, iyi bir puzolanın açık renkli, konsolide ve homojen bir yapıda, ve ortalama $2.00\text{-}2.30 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta olduğu söylenebilir. Mineralojik bileşimi değerlendirildiğinde, camsı faz ve alkali feldspat miktarlarının yüksek, kil minerallerinin ise düşük olması beklenir. İyi bir puzolanın kimyasal bileşimi incelendiğinde ise, $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ miktarının %80, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ miktarının %5, çözünmeyen kalıntı yüzdesinin %80, ve kızdırma kaybının en fazla %8 civarında olması istenir. $\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının %8'i, Fe_2O_3 miktarının ise %6'yı geçmemesi gerekir.

TS 25[3] standardında belirtilen puzolanik aktivite deneyine göre, puzolan, kireç, kum ve su ile hazırlanan harçların 7 günlük basınç mukavemetinin minimum 4 MPa olması gerekmektedir. Yine aynı standartta belirtilen ve doğal puzolanların (tras) sahip olması gereken kimyasal özellikler de Tablo 2.1.'de görülmektedir.

Tablo 2.1. TS 25'e göre doğal puzolanların sahip olması gereken kimyasal özellikler.

Kimyasal Özellik		Kütlece %
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	Minimum	70.0
SO_3	Maksimum	3.0
Re-aktif silis	Minimum	25.0
Klorür	Maksimum	0.1

2.1.4. Puzolanik Aktiviteyi Belirleyen Etkenler

2.1.4.1. Atom Yapısı

Puzolanlar, atom yapılarına göre, camsı, amorf ve kristal yapıya sahip olanlar olarak üç grupta toplanabilir. Volkanik cam, yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi puzolanlar camsı yapıya, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü vb. puzolanlar amorf yapıya, zeolit vb. puzolanlar ise kristal yapıya sahiptirler.

Puzolanların yapısında yüksek oranda silis bulunur. Puzolanik aktiviteyi belirleyen etkenlerden birisi de silis taneciklerinin atomik yapısıdır. Kristal yapıda atom örgüleri düzgün ve sık, camsı yapıda ise daha düzensiz ve boşluklu durumdadır. Yoğunluk değerleri incelendiğinde, kristal yapıdaki silis taneciklerinin yoğunluğunun camsı yapıdaki silis taneciklerinin yoğunluğundan daha yüksek olduğu görülebilir. Yoğunluk ne kadar fazla olursa çözünme o kadar zor olacağından, camsı yapıdaki silis taneciklerinin kristal yapıya oranla daha kolay çözündüğü söylenebilir[36].

Puzolanik aktivitenin atomsal yapı ile nasıl değiştiğine dair birçok çalışma yapılmıştır. Okucu, A. tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada farklı cinsten volkanik tüfler kullanılmış, ve tüflerin yapısına göre puzolanik aktivitenin nasıl değiştiği incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre, puzolanların yapısında camsı faz oranı arttıkça puzolanik aktivitede de artış olmaktadır. Dolayısıyla, camsı faz oranı ile puzolanik aktivite arasında doğru orantı söz konusudur[18].

2.1.4.2. Kimyasal Bileşim

Puzolanik malzemelerin kimyasal bileşimi, puzolanik reaksiyonlar açısından önemlidir.

Puzolanlar, bileşimlerinde SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oranları yüksek, kristal yapıları genellikle bozuk olan malzemelerdir. Puzolanik aktivitenin temeli silikatlaşmaya dayanır. Bununla birlikte, yapılan bir araştırma göstermiştir ki; puzolanik aktivite, puzolanların kimyasal bileşiminde yer alan toplam silis miktarından ziyade reaktif silis miktarına bağlıdır[14].

2.1.4.3. Kalsinasyon

TS EN 197-1 standardına göre, ısı işleme tabi tutularak aktif hale getirilen volkanik killer, şistler ve tortul kayalar kalsine edilmiş puzolanik malzeme örnekleridir.

Kalsinasyon, aktifleştirilmek istenen puzolanın cinsine göre farklı sonuçlar veren bir işlemdir. Nitekim, Mielenz ve diğer araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen ve çok sayıda doğal puzolanın kullanıldığı çalışmalarda, kalsinasyon işleminin etkisine göre puzolanlar 6 gruba ayrılmıştır. Tablo 2.2.'de verilen bu gruplardan 1, 2, 4 ve 6'nın puzolanik etkinliklerinin kalsinasyon ile arttığı görülmüştür.

Kalsinasyon sıcaklığı puzolanik aktivite için önemli bir etkidir. Puzolanik etkinlik için en uygun kalsinasyon sıcaklığı 680°C ile 870°C arasındadır. Bu değerlerden daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen kalsinasyon işleminin puzolanik etkinliği azalttığı yapılan çalışmalarda görülmüştür. Bununla birlikte, kalsinasyon işlemi sırasında puzolanik malzemelerin özgül yüzeylerinde de değişim olduğu saptanmış, ancak puzolanik aktivite ile özgül yüzey değişimi arasında bir orantı kurulamamıştır.

Tablo 2.2. Mielenz ve diğer araştırmacılara göre puzolan sınıfları[37].

Aktivite Cinsi	Ana Aktif Bileşen
1	Volkanik cam
2	Opal
3.1	Kaolinit kil
3.2	Montmorilonit kil
3.3	İllit kil
3.4	Vermikülitli kil karışımı
4	Zeolit
5	Aluminyum hidroksi oksit
6	Puzolansız (non-pozzolan)

2.1.4.4. Aktivasyon

Puzolanların aktivitelerini, reaksiyona girme kabiliyetlerini arttırmak için kullanılan yöntemler, mekanik, ısıl ve kimyasal olmak üzere üç çeşittir. Mekanik yöntemde öğütme işlemi ile tanecik boyutları minimize edilir, ısıl yöntemde yüksek sıcaklıklarda kütleme işlemi uygulanır, kimyasal yöntemde ise aktivatör ilavesi yapılır.

Doğal puzolanlarda tepkimeyi arttırmak için en sık kullanılanlar ısıl ve mekanik yöntemlerdir. Bununla birlikte, yöntemlerin mukavemet ve maliyete dayalı karşılaştırmalarında, CaCl₂ ve Na₂SO₄ katkılarının kullanılması ile gerçekleştirilen kimyasal yöntemin daha etkili olduğu görülmüştür[39].

2.1.5. Puzolanik Aktivitenin Değerlendirilmesinde Kullanılan Yöntemler

Bir puzolanı kullanabilmek için puzolanik aktivitesi hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Puzolanik malzemelerin puzolanik aktivitelerinin değerlendirilmesinde kimyasal, fiziksel, mekanik ve mikro yapısal olmak üzere başlıca dört yöntem kullanılır.

2.1.5.1. Kimyasal Yöntem

Aktivite değerlendirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemdir. Kimyasal yöntem çok çeşitli şekillerde uygulanabilir. En çok kullanılan uygulamalar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Sönmüş kireç veya portland çimentosu ile bir araya getirilmiş puzolanik malzemenin, bu birleşim sonunda oluşturduğu sabit kireç miktarı belirlenir. Sabit kireç miktarı, malzemenin yapısına ve tanecik boyutuna, kireç/puzolan oranına ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösterir.
- Esası kireç-puzolan reaksiyonuna dayanan bir diğer uygulamada, söz konusu tepkimenin hızlandırılması için, hazırlanan çimento+puzolan veya kireç+hidroksit+puzolan süspansiyonları kaynama noktasına kadar ısıtılır.
- Başka bir uygulamada ise serbest kireç miktarı değerlendirilir. Bunun için, ilk önce, puzolan-kalsiyum hidroksit süspansiyonundaki serbest kireç miktarı belirlenir. Daha sonra, bu süspansiyon 1 saat süreyle kaynatılır ve sonrasında serbest kireç miktarı tekrar belirlenerek, işlem öncesi miktar ile karşılaştırılır.
- Uçucu küllerin puzolanik aktivitesinin değerlendirilmesinde ise, puzolan-kalsiyum karışımı üzerinde HCl içinde çözünmeyen kalıntı tayini yapılır. Bu işlem için, ilk önce, karışımın HCl içinde çözünmeyen miktarı belirlenir. Sonrasında, 1000°C sıcaklıkta bir saat süreyle kalsine edilen karışımın HCl içinde çözünmeyen miktarı belirlenerek karşılaştırma yapılır.
- Puzolanik aktivitenin değerlendirilmesi için uygulanan bir diğer yöntem ise, puzolanik malzemenin kireç ile reaksiyona girmesi sonucu eriyen silis ve alüminyum oksitin tayin edilmesidir.

2.1.5.2. Fiziksel Yöntem

Puzolanların aktivitelerinin değerlendirilmesinde kullanılan fiziksel yöntemlerden biri, kalorimetrik yöntemdir. Bu yöntemde, ilk önce, puzolanik malzeme nitrik-floridik karışım içinde çözündürülür ve bu sırada açığa çıkan ısı ölçülür. Daha sonra ise, 1 saat süreyle aşındırmaya tabi tutulan çözeltide, çözünmeyen kalıntının erimesi ile açığa çıkan ısı ölçülerek karşılaştırma yapılır.

Fiziksel yöntem kullanılarak yapılan puzolanik aktivite değerlendirmesinde bir başka ölçüt ise özgül yüzey artış hızıdır. Bunun için, puzolan içeren çimento danelerinin özgül yüzeylerinin artış hızları ölçülür.

2.1.5.3. Mekanik Yöntem

Bu yöntemde, puzolan-kireç veya puzolan-çimento harçları kullanılır, ve harçlar üzerinde mekanik mukavemet ölçümü yapılır. Kirecin daha stabil bir karakteristiğe sahip olması sebebiyle, puzolan-kireç harcı üzerinde puzolan-çimento harcına nazaran daha iyi bir değerlendirme yapılabileceği söylenebilir. Bununla birlikte, puzolan-çimento harcı ise, klinker ve puzolan birleşimini doğrudan değerlendirme avantajı sunmaktadır[42].

2.1.5.4. Mikro Yapısal Yöntem

Mikro yapısal yöntemde, diferansiyel termal analiz (DTA), termogravimetrik analiz (TG), X ışını difraktometresi (XRD), X ışını floresan spektrometresi (XRF) gibi mikro yapı inceleme metotları kullanılarak puzolanik aktivite değerlendirilir.

DTA'da, bir maddenin fiziksel ve/veya kimyasal olarak değişiklik geçirebilmesi için aldığı ya da verdiği ısı karşılaştırılmaktadır. TG'de , sıcaklık etkisi ile maddede meydana gelen ağırlık kaybı ölçülmektedir. Her iki yöntemin harmanlandığı DTATG'de ise, hidratasyon reaksiyonu sonunda meydana gelen silikat ve bağlanan kalsiyum hidroksit miktarları tayin edilebilmektedir.

XRD bir faz analizi metodudur. Bu metotta, puzolanik malzeme ve nihai ürün yapısındaki mineral kristalleri analiz edilerek grafiksel sonuç alınmaktadır.

XRF’te volkanik tuf yapısındaki oksitler % olarak analiz edilmekte, ve böylece bir malzemenin puzolanlık ölçütünü veren SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 oranları belirlenmektedir.

2.2. ÇİMENTO

Çimento, su ile bir araya geldiğinde, meydana gelen reaksiyonlar sebebiyle, priz alan ve sertleşen, sertleşme sonrası su altında dahi dayanım ve kararlılığını muhafaza eden, agregaları birbirine bağlayarak masif bir yapı oluşturan inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcı malzemeler olarak tanımlanır. TS EN 197-1’e uygun çimentoya CEM çimentosu denir.

2.2.1. Çimento Türleri

Bütün çimentolarda ana bileşen klinkerdir. Klinkere farklı mineral katkıların eklenmesi ile değişik türde çimentolar ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.2.’de görüleceği üzere, TS EN 197-1 standardına göre genel çimentolar 5 ana grupta toplanmıştır.

2.2.2. Portland Çimentosu

Betonarme yapılarda kullanımı en yaygın olan çimento türüdür. Portland çimentosu, kalkerli ve killi hammaddelerin döner fırında pişirilmesiyle ortaya çıkan klinkere, belirli miktarlarda (%4-6) alçı ilave edilmesi ve 0.5 - 80 μm boyutlarında öğütülmesi sonucunda elde edilir. Dört ana bileşenden oluşur. Bunlar; Trikalsiyum silikat (C_3S), Dikalsiyum silikat (C_2S), Trikalsiyum alüminat (C_3A) ve Tetrakalsiyum alüminoferrit (C_4AF)’dir[46]. Bu bileşenlerin Portland çimentosu içindeki oranları Tablo 2.3.’te, özellikleri ise Tablo 2.4.’te verilmiştir [47].

Tablo 2.3. Tipik bir Portland çimentosunda bulunan bileşenlerin oranları[47].

Ana Bileşenler	% Miktar	
C_3S	Alit	54.1
C_2S	Belit	16.6
C_3A	Felit	10.8
C_4AF	Celit	9.1

Tablo 2.4. Portland çimentosu ana bileşenlerinin özellikleri[47].

Çimento Özelliği	Ana Bileşenler			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Tepkime hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon ısısı	Orta	Az	Çok	Orta
Erken yaş dayanımı	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
İleri yaş dayanımı	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

Çimento Türü	Adı	Notasyon	Ana Bileşenler (Kütlece % olarak)										Minör İlave Bileşenler			
			Klinker K	Yüksek Fırın Cürufu S	Silis Dumanı D	Doğal Puzolan P	Endüstriyel Puzolan O	Silissi Uçucu Kül V	Kalkersi Uçucu Kül W	Pişmiş Şist T	Kalker (Kireç Taşı) L	Kalker (Kireç Taşı) LL				
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
CEM II	Portland Cürüflü Çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
	Portland Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5		
	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5		
	Portland Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5		
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5		
	Portland Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5		
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5		
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5		
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5		
	Portland Kompoze Çimento	CEM II/A-M	80-94	12-20										0-5		
CEM II/B-M		65-79	21-35										0-5			
CEM III	Yüksek Fırın Cürüflü Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
CEM IV	Puzolanik Çimento	CEM IV/A	65-89	-	11-35										0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55										0-5	
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30										0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49										0-5

Şekil 2.2. TS EN 197-1'e göre çimento çeşitleri[44].

2.2.3. Çimento Özellikleri

Çimentoların kalite ve yeterliliğini belirlemek amacıyla tayin edilen özellikleri başlıca iki ana grupta ele alınabilir.

2.2.3.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Standart dayanım: Çimentonun standart dayanımı, TS EN 196-1'e göre tayin edilen 28 günlük basınç mukavemeti olarak tanımlanır. Bu mukavemet değeri, çimento kalitesini belirleyen en önemli kriter olmakla birlikte, çimento çeşidini belirleyen değer olarak kullanılmaktadır.

Avrupa normu ve Türk standartlarında, çimentonun standart dayanımı için sınır değerler olarak 32.5 MPa, 42.5 MPa ve 52.5 MPa olmak üzere toplam 3 sınıf kabul edilmiştir[54].

Erken dayanım: Çimentonun erken dayanımı, TS EN 196-1 standardına göre belirlenen 2 ve/veya 7 günlük basınç mukavemetidir. N harfi normal, R harfi yüksek erken dayanım sınıfını simgelemek üzere, bütün standart dayanım sınıfları için iki adet erken dayanım sınıfı belirlenmiştir.

Priz başlama süresi: Çimento hamurunun oluştuğu ilk andan başlanarak, hamurun akıcı ve plastik olma özelliğini kaybettiği zamana dek geçen süredir. Bu süre, TS EN 196-3 standardına göre, Vicat aleti yardımıyla yapılan deneyle ölçülür. Bu deneyde, Vicat iğnesinin, Vicat halkası içine yerleştirilmiş çimento hamuru yüzeyinden, taban plakasına 3-5 mm mesafe kalıncaya dek batması için geçen süre priz başlama süresi olarak kabul edilir[52].

Genleşme: Çimentonun kimyasal içeriğinde yüksek oranlarda serbest kireç ve MgO'in yer alması durumunda, hidratasyon reaksiyonu sırasında istenmeyen hacim genleşmesi oluşabilir. Çimentolarda görülen hacim genleşmesi, TS EN 196-3 standardına göre, Le Chatelier halkaları kullanılarak yapılan bir deney ile tayin edilir. Bu deneyde, çimento hamuru, ilk önce normal sıcaklıktaki kür havuzunda 24 saat bekletilir. Bu süre sonunda kaynamakta olan su içine alınan hamur 4 saat de burada tutulur. Belirtilen süre sonunda çimento hamurunda oluşan genleşme, deney aletinin çubukları arasından mm olarak ölçülür[54].

TS EN 197-1 çimentoları için öngörülen mekanik ve fiziksel özellikler Tablo 2.5.'te "karakteristik" değerler olarak gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Karakteristik değerlerle verilen mekanik ve fiziksel özellikler[44].

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)				Priz Başlama Süresi (dk)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanım		Standart Dayanım			
	2 günlük	7 günlük	28 günlük			
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75	≤ 10
32.5 R	≥ 10.0	-				
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60	
42.5 R	≥ 20.0	-				
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-	≥ 45	
52.5 R	≥ 30.0	-				
	TS EN 196-1				TS EN 196-3	

2.2.3.2. Kimyasal Özellikler

TS EN 197-1 çimentoları için öngörülen kimyasal özellikler Tablo 2.6.' da "karakteristik" değerler olarak gösterilmiştir.

Serbest kireç miktarı: Çimento içinde silikat ve alüminat halinde bağlanmamış olarak bulunan CaO, serbest kireç olarak tanımlanır. Betonda genleşmelere neden olan serbest kirecin çimento içinde mümkün olduğunca az olması istenir[52].

Klinkerin serbest kirecinin artmasının başlıca iki nedeni vardır:

- Kireç doygunluk faktörünün gereğinden yüksek olması ve
- Klinkerin soğutma işleminin yavaş olması.

Kızdırma kaybı: Çimento içinde organik bileşiklerin, CO₂ ve su gibi uçucu bileşiklerin belirli bir değerden fazla bulunmaması istenir. Standartlarda bu değer \leq % 5.0 olarak verilmiştir[52].

Çözünmeyen kalıntı. Klinker bileşikleri alkali özellikte olup tamamı asitlerde çözünür. Ancak çimento içinde hammaddeden gelen başka inert bileşikler bulunabilir. Bunların belirli değerden yüksek olması istenmez. Standartlara çözünmeyen kalıntı yüzdesinin \leq % 5.0 olması sınırı konulmuştur[52].

Tablo 2.6. Karakteristik değerlerle verilen kimyasal özellikler[44].

Özellik	Standart	Çimento Tipi	Dayanım Sınıfı	Özellikler
Kızdırma kaybı	EN 196-2	CEM I CEM III	Hepsi için	≤%5.0
Çözünmeyen kalıntı	EN 196-2	CEM I CEM III	Hepsi için	≤%5.0
Sülfat miktarı (SO ₃ olarak)	EN 196-2	CEM I CEM II CEM IV CEM V	32.5 N 32.5 R 42.5 N	≤%3.5
		CEM III	42.5 R 52.5 N 52.5 R	≤%4.0
Klorür içeriği	EN 196-21	Hepsi için	Hepsi için	≤%0.10
Puzolanik özellik	EN 196-5	CEM IV	Hepsi için	Deneyi sağlar

Sülfat miktarı (%SO₃): Çimento priz başlama süresini geciktirmek için çimento içine alçıtaşı katılması gerekir. Aksi halde trikalsiyum alüminat çok hızlı çözünerek priz süresinin çok kısılmasına neden olur. Çimento içine katılacak alçının gereğinden fazla olması sülfat korozyonuna neden olacağı için zararlıdır. Standartlarda alçı miktarının normal olarak % 3.5 SO₃'den fazla olması istenmez[52].

Diğer bileşenler: Hammadde içinde genellikle çok az miktarda bulunan alkali metal oksitleri (K₂O ve Na₂O) normal halde, çimentonun esas elamanları olan kireç, alümin veya silisle birleşmeyip, klinker içinde oksit halinde kalırlar.

Hammaddeler içinde bulunan magnezyum oksit (MgO) klinkerin pişirilmesi sırasında başka maddelerle birleşmez. Bu madde çimentoda genel olarak iki şekilde bulunur:[52]

- Klinkerin çok yavaş bir şekilde soğutulması halinde MgO kristal haline geçer. Bu durumdaki MgO' in çimento içinde bulunması önemli hacim artışlarına yol açtığından beton yapıda genleşme meydana gelir.

- Klinker çok hızlı soğutulacak olursa, bu durumda MgO amorf bir yapıya sahip olur. Amorf yapıdaki MgO' in çimento içinde bulunması sakıncalı değildir.

2.2.4. Hidratasyon Isısı

Betonun bileşiminde bulunan malzemeler karıştırıldıktan birkaç saat sonra, akıcılığı ve plastik özelliği kaybolmuş sert bir yapı oluştururlar. Bu oluşuma sebep olan, ve çimento ile suyun tepkimeye girmesi sonucu oluşan kimyasal reaksiyona “hidratasyon” denir[48].

Çimento ana bileşenlerinin su ile birleşerek başlattıkları kimyasal reaksiyonlar ekzotermiktir, yani ısı açığa çıkarır. Hidratasyon reaksiyonunun başından sonuna kadar açığa çıkan toplam ısı miktarı “hidratasyon ısı” olarak adlandırılır[55].

PÇ'yi oluşturan ana bileşenlerin su ile reaksiyonlarının hızları ve hidratasyon ısıları birbirinden farklıdır. Söz konusu bileşenlerin özellikleri Tablo 2.3.'te verilmiştir. En reaktif bileşenler olan C₃A ve C₃S, hidratasyon ısısına en çok etki eden bileşenlerdir[53].

Çimento bileşenlerinin toplam ısı üretimine katkıları, toplam hidratasyon ısısına, reaksiyon hızına ve bileşenlerin miktarına bağlıdır. Herhangi bir yaşta bulunan betonun toplam hidratasyon ısısı, üretiminde kullanılan çimentonun cinsine bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır[56].

$$H_t = a(C_3S) + b(C_2S) + c(C_3A) + d(C_4AF) \quad (2.2)$$

Burada; H_t : Toplam hidratasyon ısısı (Kj/kg),

C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF : Bogue hesabıyla elde edilen ağırlık oranı (%),

a, b, c, d : Beton yaşına göre değişen katsayılarıdır.

Çimentonun hidratasyon ısısının belirlenmesinde dört yöntem kullanılmaktadır. Bu metodlar açıklamalarıyla birlikte aşağıda verilmiştir[57].

- İzotermal kondüksiyon kalorimetresi : Çimento hidratasyon analizinde ilk kullanılan yöntem olan izotermal kalorimetrede, ısı üretimi ölçümü yapılırken, numune sabit

sıcaklıkta tutulmaktadır. Bu yöntemde, taze karışmış çimento hamuru ile ısı alıcı arasında ilişki kurulmaktadır.

- Çözelti kalorimetresi : Bu yöntemde, numunenin kimyasal bileşenlerine ayrılırken ortaya çıkan sıcaklık artışı ölçülüp ısı enerjisine çevrilir. Kimyasal çözelti içerisinde, çözünme sırasında hidrate olmuş çimentonun potansiyel enerjisi hidrate olmamış olana göre daha düşüktür. Hidrate olmamış ve kısmen hidrate olmuş çözeltiler arasındaki ısı farkı hidrasyon ısısını vermektedir.
- Adyabatik kalorimetre : Numunenin merkezindeki sıcaklığı ölçmek için dizayn edilen bu yöntemde, numuneden ısı çıkışı olmamakta, üretilen ısı numunenin ısıtılmasında kullanılmaktadır.
- Semi adyabatik kalorimetre : Numunenin izole edildiği bu yöntemde, ısının bir kısmı numuneyi ısıtırken bi kısmı ise kaybolur. Isı akış sensörleri kalorimetre içindeki ısı kaybını ölçer. Numunenin ısı kapasitesi ve ısı kaybı kullanılarak hidrasyon ısısı hesaplanır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

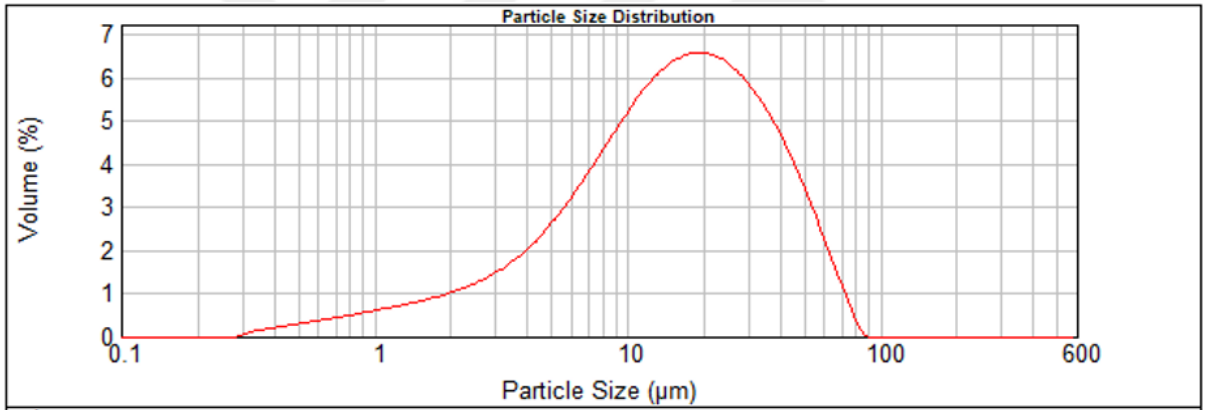
3.1. MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

3.1.1. Kum

Bu çalışmada üretilen tüm harçlarda TS EN 196-1'e uygun standart kum (Rilem kumu) kullanılmıştır.

3.1.2. Çimento

Harç üretiminde, Akçansa Büyükçekmece Fabrikası'ndan tedarik edilen CEM I 42,5 R (PÇ) çimento kullanılmıştır. Söz konusu çimentonun granülometri eğrisi Şekil 3.1.'de, kimyasal özellikleri ise Tablo 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çimento granülometri eğrisi.

3.1.3. Puzolanlar

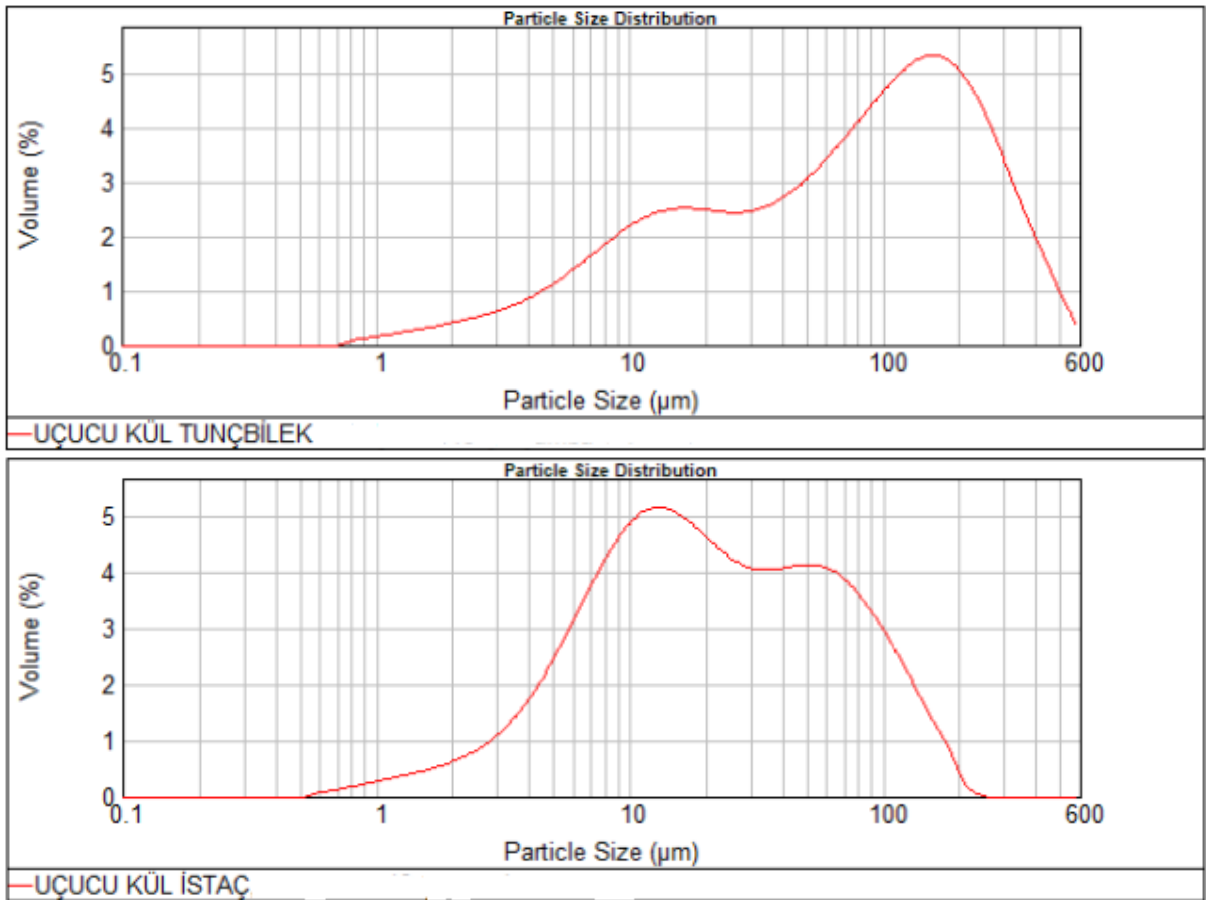
Bu çalışmada kullanılan puzolanlar; Şile trası (ŞT), Ladik trası (LT), Tunçbilek uçucu külü (TU), İçdaş uçucu külü (İU), Karçimsa yüksek fırın cürufu (KC) ve Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu (OC) dur. Puzolanların fiziksel özellikleri Tablo 3.2., granülometri eğrileri Şekil 3.2., kimyasal özellikleri ise Tablo 3.1.'de verilmiştir.

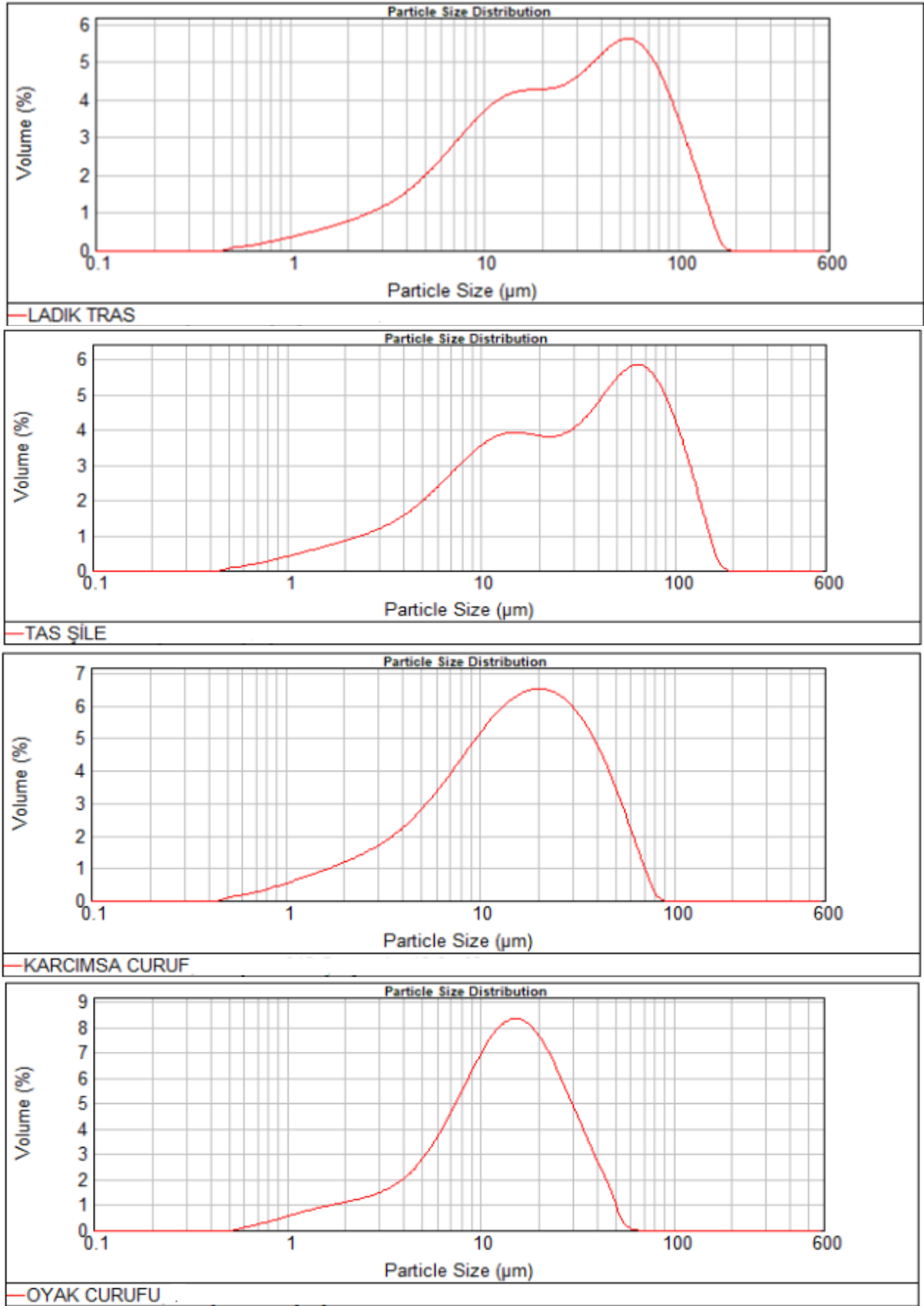
Tablo 3.1. Çimento ve puzolanlara ait kimyasal özellikler

Numune Adı	H ₂ O	CaCO ₃	Ç.K.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O	K ₂ O	K.K.	S.CaO	R.Silis
PÇ	-	-	2,58	21,46	5,07	3,82	62,39	1,06	3,46	0,037	0,31	0,72	0,96	1,20	-
ŞT	6,00	4,50	72,45	57,31	14,9	7,29	8,60	3,40	0,12	0,013	2,17	1,35	4,09	-	22,72
LT	3,00	1,75	85,00	66,04	15,33	3,82	4,23	1,18	0,49	0,014	2,63	1,93	4,49	-	15,29
TU	0,20	7,00	84,42	58,32	19,5	10,48	3,87	5,04	0,5	0,015	0,15	1,63	0,15	0,20	-
İÜ	0,60	1,50	88,32	63,65	20,48	6,96	1,47	2,14	0,47	0,011	1,22	2,40	0,23	0,50	-
KC	0,10	-	3,76	41,56	12,34	0,82	32,91	7,99	1,62	0,026	0,47	0,95	0,24	-	-
OC	0,40	-	2,57	41,28	12,58	0,85	35,04	5,9	1,74	0,020	0,47	0,78	0,84	-	-

Tablo 3.2. Puzolanların fiziksel özellikleri.

Numune Adı	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Özgül Yüzey Blaine (g/cm ²)	% Elek Üstü Kalıntı					
			32 µm	45 µm	63 µm	90 µm	125 µm	200 µm
TU	2,29	2920	64,7	51,6	43,5	33,2	22,6	10,6
İU	2,33	2560	30,5	22,6	15,7	8,9	4,6	1,7
LT	2,61	5280	39,8	27,7	16,3	5,9	1,7	0,4
ŞT	2,65	4260	37,6	20,5	10,1	3,9	0,9	0,3
OC	2,89	4620	3,5	1,5	0,9	0,3	0	0
KC	2,92	4540	8,3	1,7	0,2	0	0	0

**Şekil 3.2.** Puzolanların granülometri eğrileri.



Şekil 3.2. Pozolanların granülometri eğrileri. (devamı)

3.2. HARÇ KARIŞIM ORANLARI VE NUMUNELERİN KODLANMASI

Bu çalışmada, her birinden ikişer çeşit olmak üzere, tras, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu puzolanları kullanılmıştır. Söz konusu puzolanlar, CEM I 42.5 R çimentosuna ağırlıkça %20 oranında ikame edilerek, 40×40×160 mm boyutlarında çimento harç prizmaları üretilmiştir. Üretilen harç numuneleri kontrol harcı, tras, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı harçlar olmak üzere sırasıyla; R, T1, T2, U1, U2, C1 ve C2 kodlarıyla adlandırılmıştır. Tablo 3.3'te harç numunelerinin kodları ve bileşimleri verilmiştir.

Tablo 3.3. Harç numunelerinin kodları.

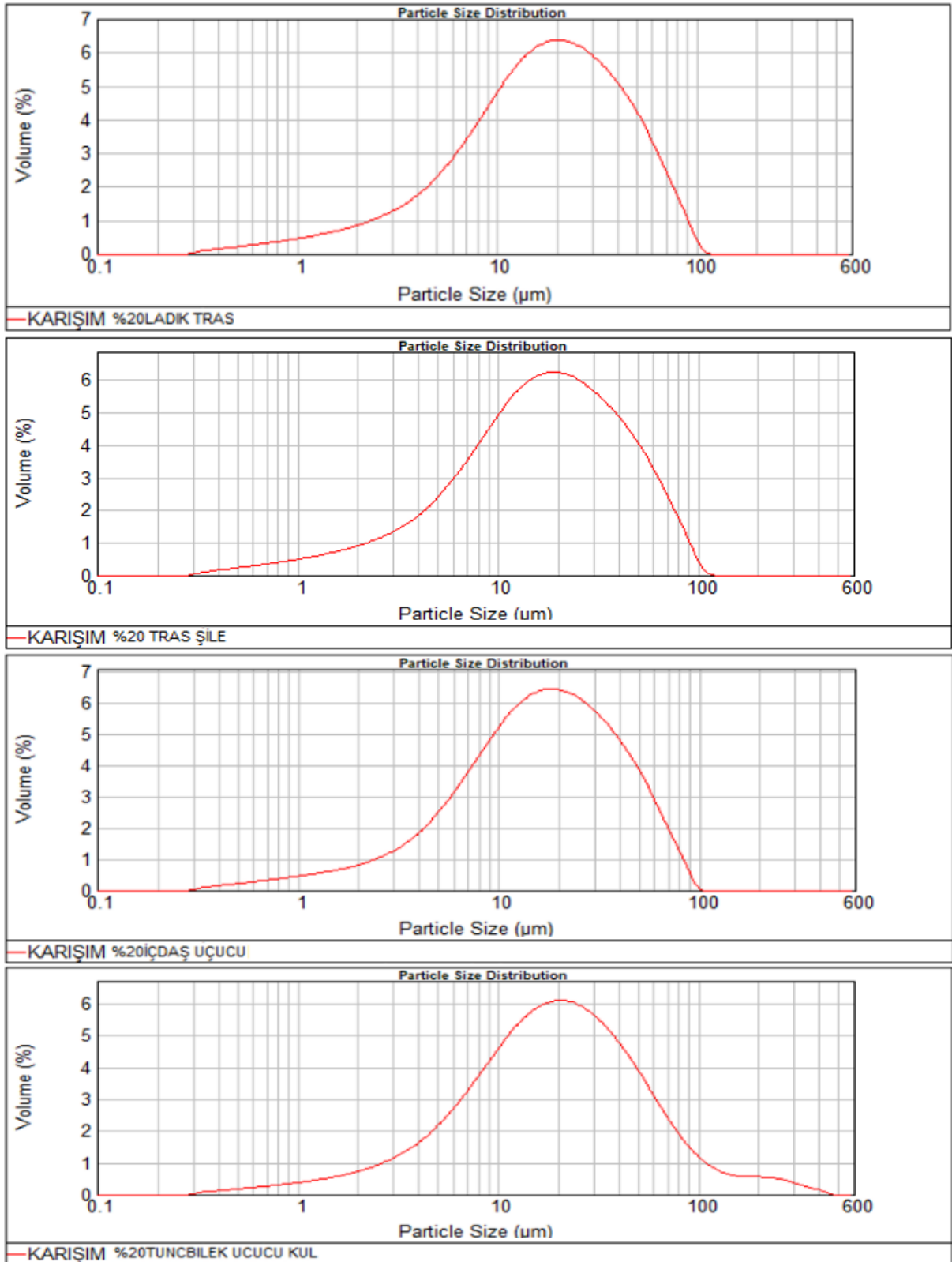
Numune Kodu	Bileşim
R	%100 PÇ
T1	%80 PÇ + %20 LT
T2	%80 PÇ + %20 ŞT
U1	%80 PÇ + %20 İU
U2	%80 PÇ + %20 TU
C1	%80 PÇ + %20 OC
C2	%80 PÇ + %20 KC

TS EN 196-1'e göre üretilen kontrol harç numunesinde 450 g çimento, %20 puzolan katkılı harç numunelerinde ise 360 g çimento ve 90 g puzolan katkısı kullanılmıştır. Üretilen bütün harçlarda Su/Çimento oranı 0.5 olarak alınmış, yani 225 g su kullanılmıştır. Harç üretiminde kullanılan standart kum miktarı ise bütün harçlarda 1350 g dır.

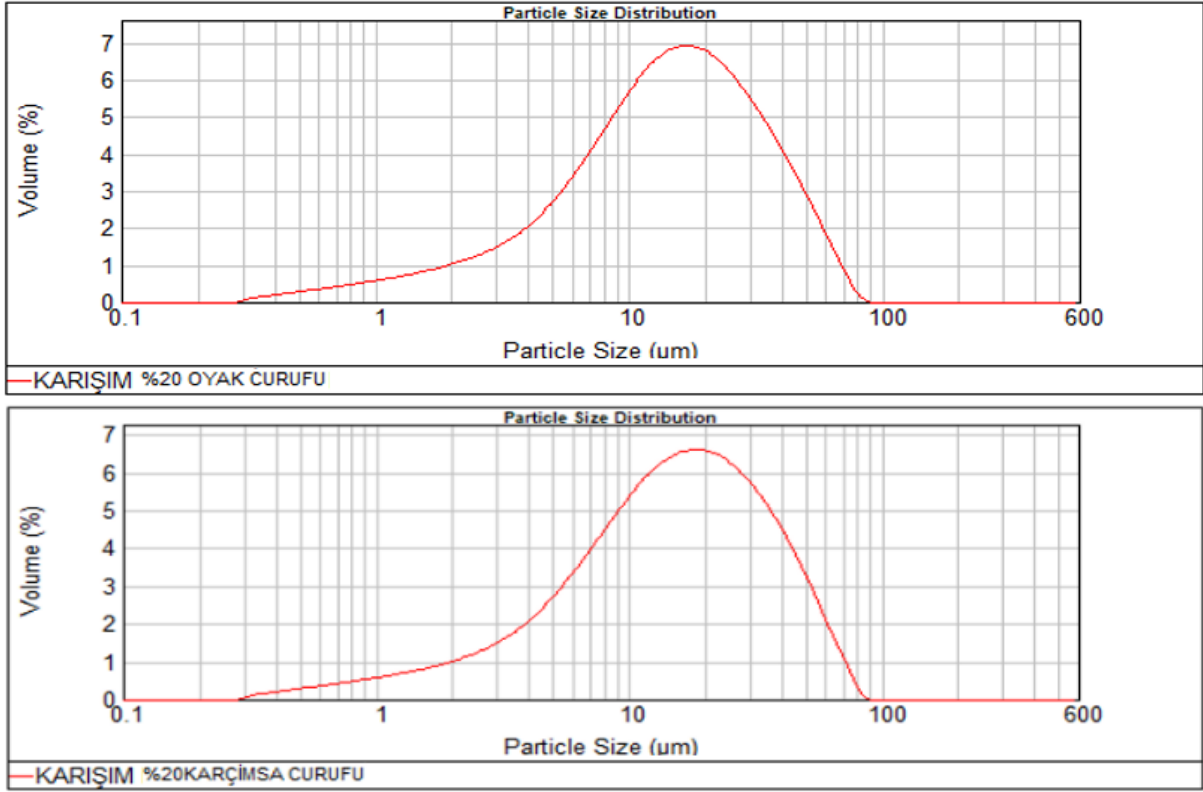
Harçlar üzerinde fiziksel ve kimyasal analizler yapılmıştır. Harçların, kıvam için gerekli su miktarı (Vicat), priz süresi, hacim genişmesi (Le Chatelier), özgül ağırlık, özgül yüzey (Blaine) değerleri ile % elek üstü kalıntı miktarları Tablo 3.4.'te, fiziksel özellikler başlığı altında verilmiştir. Bununla birlikte, harçlara ait granülometri eğrileri de Şekil 3.3.'te görülmektedir. Numune harçlar üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçları ise Tablo 3.5.'te belirtilmiştir.

Tablo 3.4. Harçların fiziksel özellikleri.

Harç Kodu	Vicat		Priz		Le Chatelier Hacim Genleşmesi (mm)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Özgül Yüzeysel Alan (g/cm ²)	% Elek Üstü Kalıntı						
	Su Miktarı (ml)	Başlama (dk)	Bitiş (dk)	32 µm				45 µm	63 µm	90 µm	125 µm	200 µm		
R	28,0	123	185		1	3,13	3590	10,8	3,6	1,2	0,2	0,0	0,0	0,0
T1	29,8	154	220		1	3,00	3710	16,4	8,6	4,2	1,3	0,3	0,1	0,1
T2	29,6	164	259		1	3,07	3780	16,5	8,4	4,4	1,4	0,4	0,1	0,1
U1	30,0	165	238		1	2,97	3140	15,4	7,8	4,0	1,5	0,7	0,2	0,2
U2	30,2	140	192		1	2,91	3440	20,1	13,0	9,0	6,3	4,5	2,2	2,2
C1	30,0	134	225		1	3,10	3720	9,7	3,5	1,3	0,5	0,1	0,0	0,0
C2	29,8	156	229		1	3,11	3410	11,2	3,8	1,5	0,7	0,2	0,0	0,0



Şekil 3.3. Harçların (çimento+puzolan karışım) granülometri eğrileri.



Şekil 3.3. Harçların (çimento+puzolan karışım) granülometri eğrileri. (devamı)

Tablo 3.5. Harçların (çimento+puzolan karışım) kimyasal özellikleri.

Numune Kodu	Çöz.Kal. %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O	K ₂ O	Kız.Kyb.	S.CaO
R	2,37	21,86	4,99	3,80	61,88	0,98	3,50	0,029	0,33	0,74	1,40	1,0
T1	19,58	29,96	7,19	3,80	49,94	1,55	2,74	0,028	1,08	1,03	2,32	0,9
T2	16,55	28,42	6,77	4,99	51,35	1,84	2,91	0,026	0,70	0,86	1,95	0,9
U1	18,57	28,74	7,76	4,56	50,60	1,57	2,85	0,025	0,45	1,13	1,84	0,9
U2	18,87	28,73	7,86	5,17	50,65	1,99	2,84	0,025	0,25	0,97	1,19	0,9
C1	2,37	25,61	6,41	3,63	55,83	2,80	2,84	0,028	0,33	0,80	1,33	0,9
C2	2,15	26,21	6,43	3,50	55,72	2,76	2,81	0,028	0,33	0,84	0,76	0,9

3.3. YAPILAN DENEYLER

3.3.1. Puzolanik Aktivite Deneyi

TS EN 196-1'e uygun olarak yapılan puzolanik aktivite deneyinde, her bir puzolan için en az 3 adet numune hazırlanır. Deney numunesi hazırlamak için gerekli malzeme miktarları, Tablo 3.6.'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Puzolanik aktivite deneyi için kullanılacak malzeme miktarları[3].

Malzeme	Kullanılacak Miktar (g)
Sönmüş kireç [Ca(OH) ₂]	150
Doğal puzolan	T = 2 x 150 (doğal puzolan yoğunluğu / sönmüş kireç yoğunluğu)
Standart kum (TS EN 196-1)	1350
Su*	0,5 (150 + T)
* Not: Hesaplanan su miktarının normal kıvamda bir harç oluşturmaya yetmediği durumda harç karıştırıcısının çalışmasına imkan veren en düşük su ilavesi yapılır ve miktarı raporda belirtilir.	

Hazırlanan numuneler kalıplara dökülür ve kalıpların üstü, buharlaşmayı önleyecek şekilde, cam plaka ile kapatılır. Numuneler 24 saat boyunca 23°C'lık sıcaklıkta bekletilir. Bu süre sonunda ise, kalıpları ile birlikte 55°C sıcaklıktaki etüv içine alınır ve burada 6 gün daha bekletilir. Toplam 7 günlük bekleme süresi sonunda numuneler etüvden çıkartılır ve sıcaklık oda sıcaklığına denk oluncaya kadar beklenir. Minimum 4 saat soğuması beklenen numuneler üzerinde, TS EN 196-1 standardına göre basınç dayanımı deneyi yapılır[3].

Bu çalışma için hazırlanan numunelerde kullanılan malzemelerin miktar bilgileri Tablo 3.7.' de verilmiştir.

Tablo 3.7. Numune hazırlamak için kullanılan malzeme miktarları.

Numune Kodu	Malzeme Miktarları (g)		
	Puzolan	Sönmüş kireç	Su
T1	356	150	253
T2	361	150	256
U1	291	150	223
U2	297	150	225
C1	391	150	272
C2	398	150	274

3.3.2. Puzolanik Özellik Deneyi

Puzolanik özellik için yapılan deney OH^- ve CaO derişimlerinin tayinidir. Bu deney için 2 adet numune hazırlanır. Numunelerin hazırlanışı şu şekildedir:

- Yeni kaynatılmış 100 ml su polietilen bir kaba konularak ağzı sıkıca kapatılır. Daha sonra 40 °C sıcaklıktaki bir etüv içine alınarak dengeye gelmesi beklenir.
- Dengeye geldikten sonra etüvden çıkarılan kap içerisine deneye tabi tutulacak puzolandan ($20 \pm 0,01$) gram eklenir.
- Hava almayacak şekilde ağzı sıkıca kapatılan kap, 20 saniye boyunca, yatay bir şekilde ve yavaşça çalkalanır. Kabın tabanı yatay duracak şekilde tekrar 40 °C' lik etüve koyulur.
- 8 veya 15 gün süreyle etüvde bekletilen numune, Buchner hunisinden vakumlu erlene çift kat süzgeç kağıdı kullanılarak süzülür. Süzüntü oda sıcaklığına kadar soğutulur.

Hidroksil iyonu derişiminin tayini için, süzüntüden pipet yardımıyla 50 ml alınır ve 250 ml' lik behere aktarılır. 5 damla metil oranj indikatörü damlatılarak, faktörü belli olan 0,1 N HCl ile sarıdan portakal rengine dönünceye kadar titre edilir ve sarfiyat kaydedilir.

Hidroksil iyonu derişimi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$[\text{OH}]^- = (1000 \times 0,1 \times V3 \times f2) / 50 = 2 \times V3 \times f2 \quad (3.1)$$

Burada;

V3 : Titrasyonda sarf edilen 0,1 N HCl sarfiyatı (ml),

f2 : 0,1 N HCl çözeltisinin faktörü (g/ml) dür.

Kalsiyum oksit derişiminin tayini için, hidroksil tayini yapılan çözeltinin pH'ı %10'luk NaOH çözeltisi ve pH metre kullanılarak $12,5 \pm 0,2$ değerine ayarlanır. Çözeltiye 0,1 g Calcon veya Patton and Reeders karışım indikatörü eklenir. Çözelti 0,03 mol/L' lik EDTA çözeltisi yardımıyla dönüm noktasına kadar titre edilerek sarfiyat kaydedilir. Calcon indikatörü için renk dönüşümü pembeden maviye, Patton and Reeders için ise mordan açık maviyedir.

Kalsiyum oksit derişimi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$[\text{CaO}] = (1000 \times 0,03 \times V4 \times f1) / 50 = 0,6 \times V4 \times f1 \quad (3.2)$$

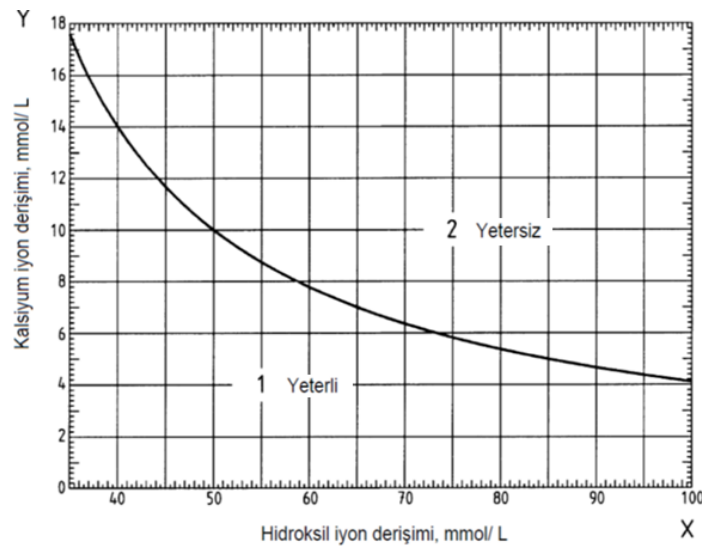
Burada;

V4 : Titrasyonda sarf edilen EDTA çözeltisi hacmi (ml),

f1 : EDTA çözeltisi faktörü (g/ml) dür.

Hesaplanan derişimler en yakın 0,1 mmol/L'ye yuvarlanır ve Şekil 3.4. üzerinde kesiştirilir.

Kesişme bölgesine göre puzolanik özelliğin yeterli olup olmadığına karar verilir.



Şekil 3.4. Puzolanik özelliğin tayini için kullanılan grafik[35].

3.3.3. Hidratasyon Isısı Ölçümü

Numunelerin hidratasyon ısı ölçümleri, AKÇANSA Büyükçekmece Fabrikası Kalite Kontrol Laboratuvarı'nda bulunan TAM Air Thermometric marka izotermal kalorimetre cihazı ile, 20 °C sabit sıcaklıkta yapılmıştır.

Cihazın tüplerine 1,6 gram su konulmuş ve üzerine 4'er gram numune dökülerek karıştırılmıştır. Tüpler cihazın haznesine yerleştirilmiş ve ölçümler TSE CEN/TR 16632 standardına uygun olarak yapılmıştır. Cihazdan alınan hidratasyon ısı sonuçları 1, 3, 7 ve 28 günlüktür.

3.3.4. Birim Ağırlık Deneyi

TS EN 196-1 standardına göre hazırlanan 40mm x 40mm x 160mm boyutlu prizmatik numunelerin 2,7, 28 ve 56 gün sonunda ağırlıkları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar prizma hacmine bölünerek birim ağırlık hesabı yapılmıştır. Sertleşmiş harç numunelerinin ağırlıkları Tablo 3.8.'de verilmiştir.

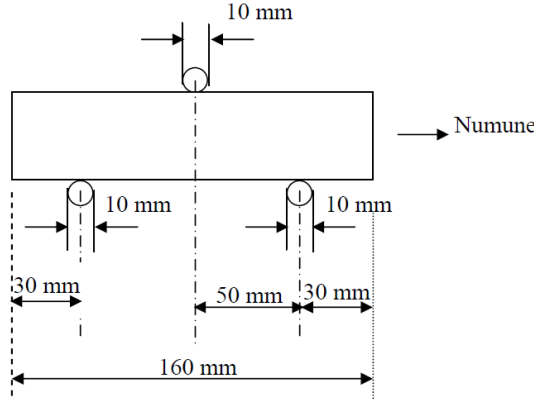
Tablo 3.8. Sertleşmiş harç numunelerinin ölçülen ağırlıkları.

Numune Kodu	Ortalama Prizma Ağırlığı (g)			
	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün
R	571,67	572,33	575	576,67
T1	569,33	570,67	571,67	570
T2	570	570,33	570	570
U1	573,67	573,67	574	575,33
U2	568,67	568,67	568,67	570
C1	573,67	573,33	573	574,67
C2	574,67	573,33	574,67	576

3.3.5. Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyleri

TS EN 196-1'e göre hazırlanan 40x40x160 mm boyutlu 3 adet prizmatik numune ilk önce eğilmeye tabi tutulur. Eğilme deneyi için kullanılan cihaz, birbirinden uzaklığı 100 mm olan,

10 mm çapında iki adet çelik mesnet silindiri ile her ikisi arasında merkezi olarak yerleştirilen, aynı çaptaki bir üçüncü çelik yükleme silindirinden oluşan bir düzendir. Yükleme düzeneği Şekil 3.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Eğilme dayanımı yükleme düzeneği

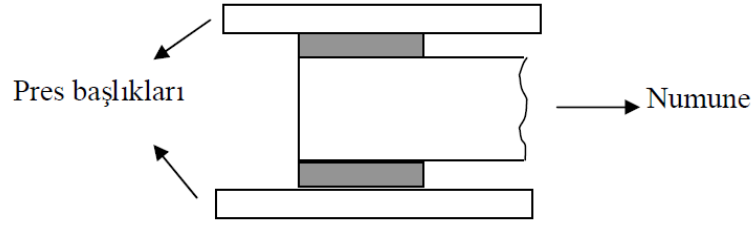
Eğilme dayanımı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times I}{b^3} \quad (3.3)$$

- Burada;
- R_f : Eğilme Mukavemeti (MPa),
 - b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm),
 - F_f : Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),
 - I : Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm) tır.

Bu çalışmada eğilme dayanımı deneyi için numunelere uygulanan kuvvet 300kN'dur.

Üç numune için bulunan sonuçların ortalaması alınarak eğilme dayanımı hesaplanır. İki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar basınç dayanımı deneyine tabi tutulur. Yarım prizmalar 4x4 cm'lik metal kırma başlığı ile kırma presinde kırılır. Yükleme düzeneği Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Basınç dayanımı yükleme düzeneği

Basınç dayanımı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$R = \frac{F_c}{A} \quad (3.4)$$

Burada; R_c : Basınç Mukavemeti (MPa),
 F_c : Kırılmadaki en büyük yük (N),
 A : Kesit alanı (40mm x 40 mm = 1600mm²) dir.

Bu çalışmada basınç dayanımı deneyi için numunelere uygulanan kuvvet 600kN'dur.

4. BULGULAR

4.1. FİZİKSEL VE KİMYASAL ANALİZ SONUÇLARI

4.1.1. Puzolanlar

Tablo 3.2.'de puzolanlara ait fiziksel özellikler verilmiştir. Buna göre, kullanılan puzolanların özgül ağırlıklarının $2,29 \text{ g/cm}^3$ ile $2,92 \text{ g/cm}^3$ arasında olduğu görülmektedir. Özgül ağırlığı en düşük puzolan Tunçbilek uçucu külü, en yüksek puzolan ise Karçimsa yüksek fırın cürufudur.

Özgül yüzey-Blaine değerleri 2560 g/cm^2 ile 5280 g/cm^2 arasında değişen puzolanlar arasında en yüksek özgül yüzey değeri Ladik trasına, en düşük özgül yüzey değeri ise İçdaş uçucu külüne aittir.

$32 \mu\text{m}$ ile $200 \mu\text{m}$ arasındaki elekler kullanılarak yapılan elek analizi sonuçlarına göre, parçacık boyutu dağılımı en geniş puzolan Tunçbilek uçucu külü, parçacık boyutu dağılımı en dar puzolan ise Karçimsa yüksek fırın cürufudur.

Puzolanların analiz edilen kimyasal özelliklerine ait sonuçlar Tablo 3.1.'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, H_2O yüzdesi en yüksek puzolan %6 ile Şile trası, en düşük puzolan ise %0,1'lik değer ile Karçimsa yüksek fırın cürufudur.

İçeriğinde bulunan CaCO_3 oranı en yüksek puzolan Tunçbilek uçucu külü, değeri ise %7'dir.

Çözünmeyen kalıntı tayini sonuçları göstermektedir ki, kullanılan çimentoya en yakın değerleri yüksek fırın cürufları göstermiştir. Bu değerler Oyak Ereğili yüksek fırın cürufu için %2.57, Karçimsa yüksek fırın cürufu için %3.76'dır. Trasların çözünmeyen kalıntı oranları Şile trasında %72.45, Ladik trasında %85 iken uçucu küllerin çözünmeyen kalıntı oranları Tunçbilek uçucu külünde %84.42, İçdaş uçucu külünde ise %88.32'dir.

Puzolanlar, içeriklerinde bulunan toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranlarına göre incelendiğinde, en yüksek değer %91,09 ile İçdaş uçucu külüne, en düşük değer ise %54,71 ile Oyak Ereğili yüksek fırın cürufuna aittir. TS 25 standardına göre doğal puzolanın içeriğinde bulunması gereken toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranı minimum %70 olmalıdır. Buna göre kullanılan Şile trası ve Ladik trasının standartta belirtilen bu şarta uygun oldukları söylenebilir.

CaO oranı en yüksek puzolan %35,04 ile Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu, en düşük puzolan ise %1,47 ile İçdaş uçucu külüdür. Aynı şekilde MgO oranı en yüksek puzolanın %7,99 ile Karçimsa yüksek fırın cürufu, en düşük olanın ise %1,18 ile Ladik trası olduğu görülmektedir.

SO₃ oranları incelendiğinde, en yüksek değer %1,74 ile Oyak Ereğli yüksek fırın cürufuna, en düşük değer ise %0,12 ile Şile trasına aittir. TS 25 standardına göre doğal puzolanın içeriğinde bulunması gereken SO₃ oranı maksimum %3,0 olmalıdır. Buna göre, %0,12 oranına sahip Şile trası ile %0,49 oranına sahip Ladik trasının bu şartı sağladığı görülmektedir.

Puzolanları içeriğinde bulunan klorür oranına göre sıraladığımızda, en yüksek orana sahip puzolan Karçimsa yüksek fırın cürufu, değeri ise %0,0255'tir. Klorür oranı en düşük puzolan ise, %0,0109 ile İçdaş uçucu külüdür. TS 25 standardına göre, doğal puzolanın içeriğinde bulunması gereken klorür oranı maksimum %0,1 olmalıdır. %0,0128 oranına sahip Şile trası ile %0,0138 oranına sahip Ladik trasının bu şartı sağladığı görülmektedir.

Na₂O oranı en yüksek puzolan %2,63 ile Ladik trası, en düşük puzolan ise %0,15 ile Tunçbilek uçucu külüdür. Aynı şekilde K₂O oranı en yüksek puzolanın %2,40 ile İçdaş uçucu külü, en düşük olanın ise %0,78 ile Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu olduğu görülmektedir.

Kızdırma kaybı oranları incelendiğinde, en yüksek değer %4,49 ile Ladik trasına, en düşük değer ise %0,15 ile Tunçbilek uçucu külüne aittir.

Serbest CaO oranları göz önüne alındığında, Tunçbilek uçucu külünün serbest CaO oranı %0,2, İçdaş uçucu külünün ise %0,5 olarak bulunmuştur. Reaktif silis miktarı ise, Şile trasında %22,72, Ladik trasında %15,29 ölçülmüştür. TS 25 standardı, doğal puzolanın içeriğinde minimum %25 oranında reaktif silis bulunması gerektiğini belirtmektedir. Buna göre, bu çalışmada kullanılan Şile trası ve Ladik trasının bu şartı sağlamadığı görülmektedir.

Daha önce de belirtildiği üzere, puzolanlar hakkında bir genelleme yapılacak olursa, iyi bir puzolanın açık renkli, konsolide ve homojen bir yapıda, ve ortalama 2.00-2.30 g/cm³ yoğunlukta olduğu söylenebilir. Bu aralıkta yoğunluğa sahip tek puzolan Tunçbilek uçucu külüdür. Puzolanların mineralojik bileşimi değerlendirildiğinde, camsı faz ve alkali feldspat miktarlarının yüksek, kil minerallerinin ise düşük olması beklenir. İyi bir puzolanın kimyasal bileşimi incelendiğinde ise, SiO₂+Al₂O₃ miktarının %80, Na₂O+K₂O miktarının %5, çözünmeyen kalıntı yüzdesinin %80, ve kızdırma kaybının en fazla %8 civarında olması istenir.

MgO+Fe₂O₃ miktarının %8'i, Fe₂O₃ miktarının ise %6'yı geçmemesi gerekir. Puzolanları bu şartlara göre değerlendirdiğimizde, SiO₂+Al₂O₃ miktarı %80 ve üzeri olan puzolanlar Ladik trası ile İçdaş uçucu külüdür. %5'lik Na₂O+K₂O miktarı şartını hiçbir puzolan sağlayamamıştır. Çözünmeyen kalıntı yüzdesinin %80 ve üzeri olarak bulunduğu puzolanlar Tunçbilek uçucu külü, İçdaş uçucu külü ve Ladik trasıdır. Kızdırma kaybı oranını bütün puzolanlar sağlamaktadır. MgO+Fe₂O₃ miktarı şartını sağlayan puzolanlar Ladik trası ile Oyak Ereğli yüksek fırın cürufudur. Bununla birlikte Fe₂O₃ miktarı %6'yı geçmeyen puzolanlar ise Ladik trası, Karçimsa ve Oyak Ereğli yüksek fırın cüruflarıdır. İyi bir puzolan için bütün şartlar incelendiğinde, yoğunluk değeri ve Na₂O+K₂O miktarı şartı haricindeki bütün şartları sağlayan tek puzolanın Ladik trası olduğu görülmektedir.

4.1.2. Çimento

Kullanılan CEM I 42.5 R tipi çimentoya ait kimyasal özellikler Tablo 3.1.'de verilmiştir. TS EN 197-1 standardına göre, CEM I tipi çimentoda kızdırma kaybı oranının maksimum %5, çözünmeyen kalıntı miktarının maksimum %5, sülfat miktarının (SO₃ olarak) maksimum %3,5 ve klorür oranının maksimum %0,10 olması gerekmektedir. Söz konusu standarttaki değerlere göre incelendiğinde, kızdırma kaybı değeri %0,96, çözünmeyen kalıntı oranı %2,58, SO₃ olarak sülfat miktarı %3,46 ve klorür içeriği %0,0369 olan çimentomuzun standartta belirtilen şartları sağladığı görülmektedir.

TS EN 197-1 standardına göre, CEM I 42.5 R sınıfı çimentonun 2 günlük erken dayanımının değerinin minimum 20 MPa, 28 günlük standart dayanım değerinin ise minimum 42,5 MPa ile maksimum 62,5 MPa aralığında olması gerekmektedir. Buna göre, erken dayanımı 28,7 MPa ve standart dayanımı 58,2 MPa olarak ölçülen çimentomuz bu şartları sağlamaktadır. Yine aynı standarda göre, CEM I 42.5 R sınıfı çimentonun priz başlama süresinin minimum 60 dakika ve genişleme değerinin maksimum 10 mm olması istenmektedir. Kullanılan çimentonun priz başlama süresi 123 dakika ve hacim genişmesi ise 1 mm'dir. Bu sonuçlara göre, kullanılan çimentonun TS EN 197-1 standardına uygun özellikte olduğu söylenebilir.

4.1.3. Harçlar

Harçlara ait fiziksel özellikler Tablo 3.4.'te verilmiştir. Normal kıvamın sağlanması için eklenmesi gereken su miktarları (Vicat) değerlendirildiğinde, en yüksek miktar 30,2 ml ile

Tunçbilek uçucu külü ikameli harca, en düşük miktar ise 29,6 ml ile Şile trası ikameli harca aittir. Şahit numune için gerekli su miktarı 28,0 ml olarak ölçülmüş olup, puzolan katkısının normal kıvam için gerekli su miktarını arttırdığı söylenebilir.

Priz süreleri yönünden incelendiğinde, en uzun priz süresine sahip harç 95 dakika ile Şile trası ikameli harç olurken, en kısa priz süresini ise 52 dakika ile Tunçbilek uçucu külü ikameli harç göstermiştir. Şahit numunenin priz süresi ise 62 dakikadır. Tablo sonuçlarına göre, Tunçbilek uçucu külü ikamesinin priz süresini kısalttığı, diğer puzolanların ise priz süresini uzattığı söylenebilir.

Hacim genişmesi (Le Chatelier) değeri bütün harçlarda 1 mm olarak ölçülmüştür.

Özgül ağırlık değeri en yüksek harç, $3,11 \text{ g/cm}^3$ ile Karçimsa yüksek fırın cürufu ikameli olan, en düşük olan ise $2,91 \text{ g/cm}^3$ değer ile Tunçbilek uçucu külü ikameli olan harçtır. Şahit numunenin özgül ağırlığı $3,13 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. Buna göre, puzolan ikamesinin özgül ağırlık değerini düşürdüğü söylenebilir.

Özgül yüzey (Blaine) değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değer 3780 g/cm^2 ile Şile trası ikameli harca, en düşük değer ise 3140 g/cm^2 ile İçdaş uçucu külü ikameli harca aittir. Şahit numunenin özgül yüzeyi 3590 g/cm^2 olarak ölçülmüştür. Tablo değerlerine bakıldığında, Ladik trası, Şile trası ve Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu ikamesinin özgül yüzeyi arttırdığı, diğer puzolanların ikamesinin ise özgül yüzey değerini düşürdüğü söylenebilir.

Harçların kimyasal özellikleri Tablo 3.5.'te verilmiştir. Şahit numunenin ölçülen değerlerini puzolan ikamesinin nasıl değiştirdiği aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

Çözünmeyen kalıntı yüzdesi şahit numunede 2,37 olarak belirlenmiştir. Karçimsa yüksek fırın cürufu ikamesi bu değeri 2,15'e düşürürken, Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu ikamesi ise bu değerini sabit kalmasını sağlamıştır. Diğer puzolanların çözünmeyen kalıntı yüzdesi ise şahit numunenin değerinin çok çok üstündedir.

Şahit numunenin SiO_2 oranı %21,86, Al_2O_3 oranı %4,99 ve Fe_2O_3 oranı ise %3,80 olarak belirlenmiştir. Tablo sonuçları göstermektedir ki, puzolan ikamesi SiO_2 ve Al_2O_3 oranını arttırmıştır. Tablo sonuçlarına göre, yüksek fırın cüruflarının ikamesi Fe_2O_3 oranını düşürmüştür,

Ladik trası ikamesi oranının sabit kalmasını sağlamış, diğer puzolanlar ise Fe_2O_3 oranını arttırıcı yönde etki yapmıştır.

CaO ve MgO oranları incelendiğinde, puzolan ikamesinin, şahit numunenin %61,88 olan CaO oranını düşürdüğü, %0,98 olan MgO oranını ise yükselttiği görülmektedir. Aynı şekilde, şahit numunenin %3,50 olan SO_3 ve %0,0291 olan klorür oranları puzolan ikamesi ise azalmıştır.

Şahit numunenin ölçülen Na_2O oranı %0,33, K_2O oranı ise %0,74'tür. Tunçbilek uçucu küllü Na_2O oranını düşürmüş, yüksek fırın cürufları bu oranın sabit kalmasını sağlamış, diğer puzolanlar ise bu oranı yükseltmiştir. K_2O oranı ise puzolan ikamesi ile artış göstermiştir.

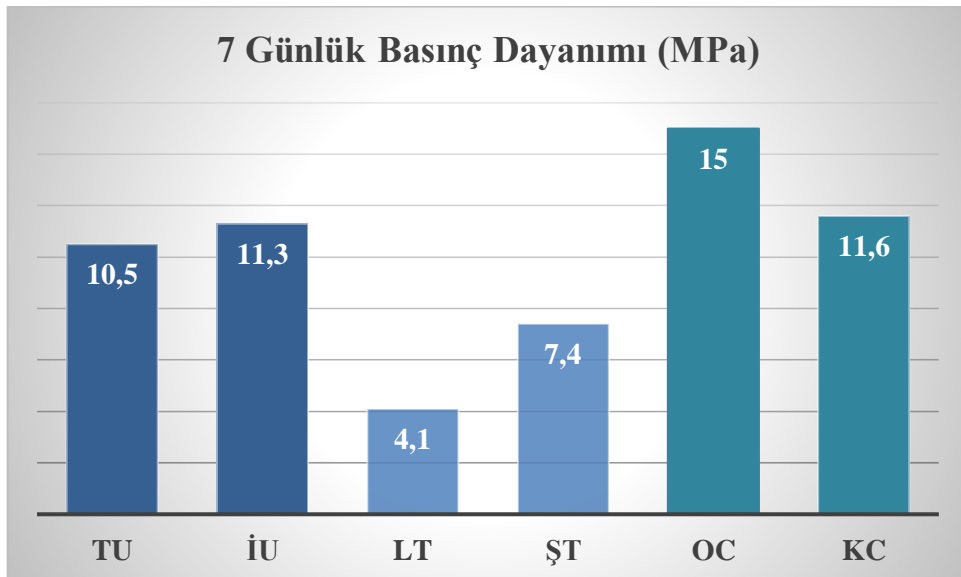
Kızdırma kaybı oranı şahit numune için %1,40'tır. Bu değer, Tunçbilek uçucu küllü ve yüksek fırın cürufu ikamesi ile azalmış, diğer puzolanların ikamesi ile yükselmiştir. Şahit numunede %1 olan serbest CaO oranı puzolan ikamesi ile %0,9'a düşmüştür.

4.2. DENEY SONUÇLARI

4.2.1. Puzolanik Aktivite Deneyi

TS 25'e uygun olarak yapılan puzolanik aktivite deney sonuçları Şekil 4.1.'de verilmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde, kullanılan puzolanların her birinin, TS 25 standardında belirtilen, 7 gün sonunda minimum 4 MPa basınç dayanımına sahip olma şartını sağladıkları görülmektedir.



Şekil 4.1. Puzolanik aktivite deney sonuçları.

Puzolanik aktivite deney sonuçlarına göre en yüksek dayanıma sahip olan puzolan, 15 MPa dayanım değeriyle, OC kodlu Oyak Ereğli yüksek fırın cürufudur. Onu, 11.6 MPa'lık dayanım değeriyle KC kodlu Karçimsa yüksek fırın cürufu izlemektedir. Bununla birlikte, en düşük dayanım değerine sahip puzolan 4,1 MPa'lık dayanım ile, LT kodlu Ladik trasıdır. ŞT kodlu Şile trası ise, 7,4 MPa'lık dayanım değeri ile, ikinci en düşük dayanıma sahip puzolan olmuştur. İU kodlu İçdaş uçucu külü 11.3 MPa, TU kodlu Tunçbilek uçucu külü ise 10.5 MPa dayanım göstermiştir.

Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, bu çalışmada kullanılan puzolanlar arasında en yüksek puzolanik aktivite değeri Oyak Ereğli yüksek fırın cürufuna, en düşük puzolanik aktivite değeri ise Ladik trasına aittir. Puzolan grupları olarak değerlendirildiğinde, bu çalışmada kullanılan yüksek fırın cüruflarının puzolanik aktivitesi, yine bu çalışmada kullanılan uçucu küller ve trasaların puzolanik aktivitelerinden daha yüksektir.

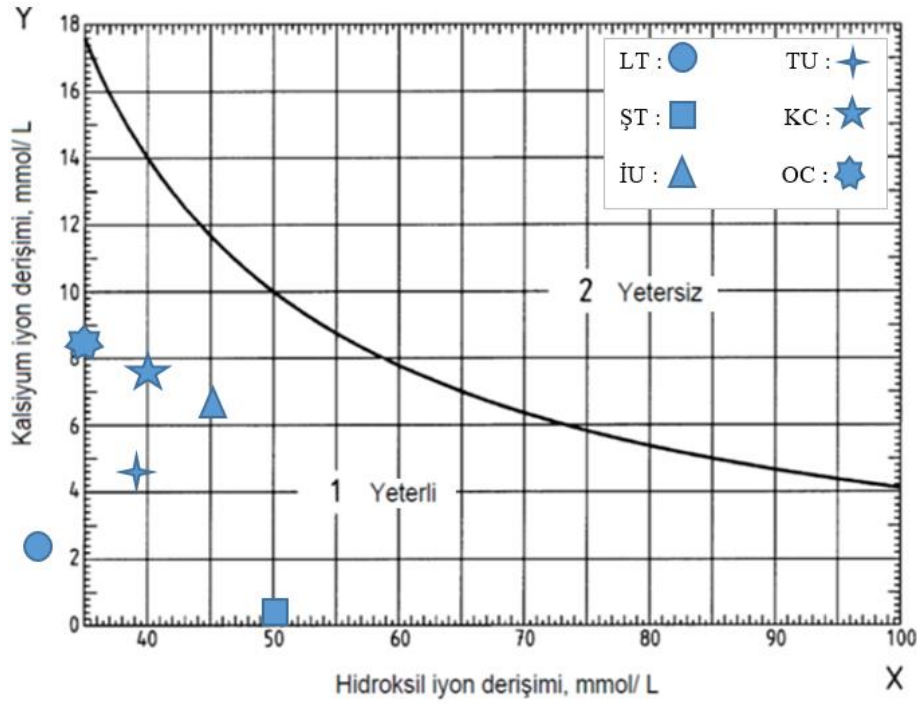
4.2.2. Puzolanik Özellik Deneyi

TS EN 196-5'e uygun olarak yapılan puzolanik özellik deney sonuçları Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Puzolanik özellik deney sonuçları.

Puzolan	Derişim (mmol/L)	
	OH ⁻	CaO
LT	18	2,43
ŞT	50	0,21
İU	45	6,42
TU	38	4,56
KC	40	7,65
OC	35	8,12

Puzolanların tayin edilen OH⁻ ve CaO derişimlerinin kesişim noktaları Şekil 4.2.'de görülmektedir. Deney sonuçlarına göre, bu çalışmada kullanılan puzolanların her birinin puzolanik özelliği yeterli bölgededir. Başka bir ifadeyle, bu çalışmada kullanılan puzolanlar, çimento yerine ikame edilerek harç üretimine uygun malzemelerdir.



Şekil 4.2. Puzolanik özellik deney sonuçları

4.2.3. Hidratasyon Isısı Ölçümü

1, 3, 7 ve 28 günlük hidratasyon ısı ölçüm sonuçları Tablo 4.2.'de verilmiştir.

24 saatlik hidratasyon ısı değerleri incelendiğinde, en yüksek değer 147,56 J/g ile şahit numuneye aittir. Katkılı harçlar arasında bir kıyaslama yapılırsa, 24 saat sonunda en yüksek hidratasyon ısısına sahip harcın U1 olduğu görülmektedir. İçdaş uçucu külü ikamesi ile hazırlanmış bu harcın 24 saat sonundaki hidratasyon ısı değeri 136,57 J/g'dır. 24 saatlik hidratasyon ısı en düşük numune ise, 122,56 J/g değeriyle, Tunçbilek uçucu külü ikameli harç U2'dir.

72 saatlik hidratasyon ısı değeri en yüksek harç, 231,66 J/g ile yine şahit numunedir. Katkılı harçlar arasında ise, en yüksek değer 220,56 J/g ile Ladik trası ikameli harç T1'e, en düşük değer ise 202,37 J/g ile Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu katkı harç C1'e aittir.

7 gün sonunda ölçülen hidratasyon ısı değerleri, en yüksek hidratasyon ısısının 271,18 J/g ile T1'e, en düşük hidratasyon ısısının 211,39 J/g ile C1'e ait olduğunu göstermiştir. Şahit numunenin hidratasyon ısı ise 253,98 J/g olarak ölçülmüştür.

28 günlük hidrasyon ısı en yüksek numune T1 ve değeri 341,75 J/g, en düşük numune ise C1 ve değeri 215,18 J/g'dır. Şahit numunenin hidrasyon ısı 254,45 J/g'dır.

Tablo 4.2. Hidrasyon ısı ölçüm sonuçları.

Numune Kodu	Hidrasyon Isısı (J/g)			
	24 saat	72 saat	7 gün	28 gün
R	147,56	231,66	253,98	254,45
T1	128,80	220,56	271,18	341,75
T2	127,04	219,07	265,35	340,83
U1	136,57	210,66	249,01	323,10
U2	122,56	213,42	256,68	325,65
C1	127,21	202,37	211,39	215,18
C2	129,10	209,53	227,30	227,95

Numune harçların hidrasyon ısılarının günden güne nasıl değişim gösterdikleri aşağıda açıklanmaktadır.

1.günden 3.güne: En yüksek değişim oranı %74,14 ile U2'ye aittir. 1.günde 122,56 J/g ölçülen hidrasyon ısı değeri 3.günde 213,42 J/g olarak ölçülmüştür. En düşük değişim oranını ise %54,25 ile U1 göstermiştir. 1.gün sonunda 136,57 J/g ölçülen hidrasyon ısı değeri 3.gün sonunda 210,66 J/g olmuştur. Şahit numuneye ait değişim oranı %56,99'dur.

3.günden 7.güne: En yüksek değişim oranı %22,95 ile T1'e, en düşük değişim oranı ise %4,46 ile C1'e aittir. Şahit numunenin değişim oranı ise %9,63'tür.

7.günden 28.güne: En yüksek değişim oranını %29,75 ile U1, en düşük değişim oranını ise %0,19 ile şahit numune göstermiştir.

1.günden 28.güne: En yüksek değişim oranı T2'ye aittir. 1.gün sonunda 127,04 J/g olarak ölçülen hidrasyon ısı 28.gün sonunda 340,83 J/g'a yükselmiştir. T2'nin hidrasyon ısısında, 1.günden 28.güne iki kattan fazla artış görülmektedir. En düşük değişim oranı ise %69,15 ile

C1'de görülmüştür. Şahit numune hidrasyon ısısının 1.günden 28.güne değişim oranı %72,44'tür.

Hidrasyon ısı, en basit ifadeyle, çimentonun su ile reaksiyonu sonucu açığa çıkan ısı miktarıdır. Bu ısının yaklaşık yarısı ilk üç gün içinde, % 90'ı da ilk üç ay içinde açığa çıkar. Numunelerin hidrasyon ısı ölçüm sonuçları incelendiğinde, hidrasyon ısılarındaki en yüksek artış oranının 1.günden 3.güne olduğu görülmektedir. Bu günler arasındaki artış oranı, her bir numune için %50'nin üzerindedir. Bu oran, 3.günden 7.güne düşüş göstermiş, maksimum %23 olabilmıştır. Bu sonuçlar göstermektedir ki, hidrasyon ısısının artış hızı ilk üç günde en yüksek değerini almakta, ilerleyen günlerde ise azalarak hidrasyon reaksiyonu sonuna kadar devam etmektedir.

Puzolanlar ya da başka bir deyişle puzolanik malzemeler, çimento ve betonun özelliklerine olumlu yönde değiştirici katkı yaparlar. Hidrasyon ısısını düşürmek de bu olumlu katkılardan biridir. Hidrasyon ısı ölçüm sonuçları incelendiğinde görülmektedir ki, ilk üç gün için en yüksek değerler şahit numuneye aittir, katkılı harçların her birinin hidrasyon ısı şahit numuneninkinden düşüktür. İlerleyen günlerde ise, bazı numunelerde, şahit numuneninkinden daha yüksek değerlerde hidrasyon ısıları görülmüştür.

4.2.4. Birim Ağırlık Deneyi

Birim ağırlık değerleri, ortalama prizma ağırlıklarının prizma hacmine bölünmesi ile belirlenmiştir. Numunelerin 2, 7, 28 ve 56 günlük birim ağırlık sonuçları Tablo 4.3. ve Şekil 4.2.'de verilmiştir.

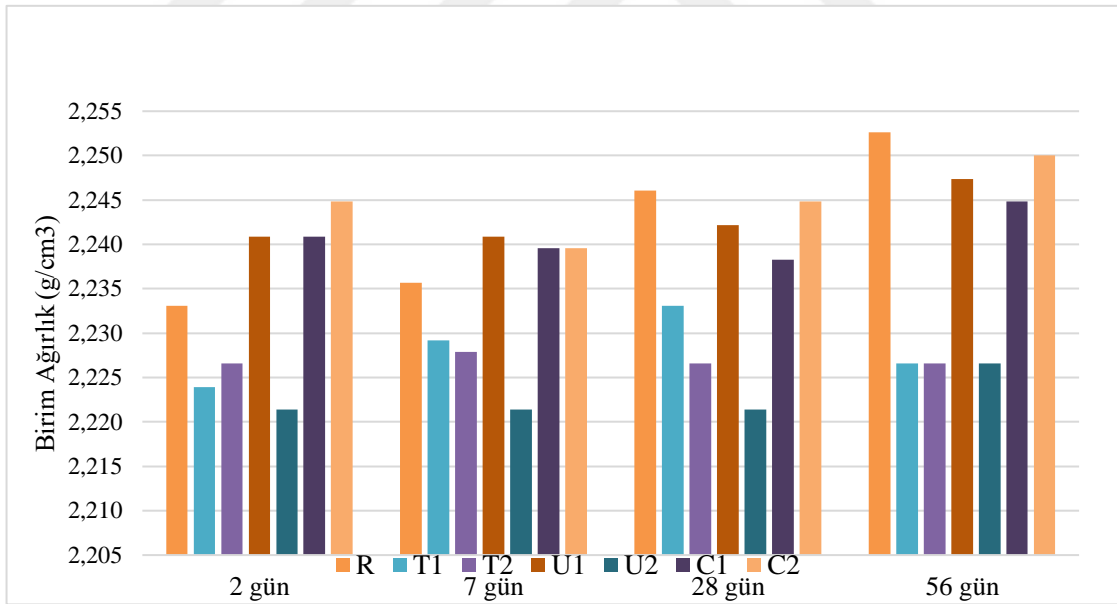
Deney sonuçları incelendiğinde, şahit numuneye ait birim ağırlık değerinin sürekli arttığı görülmektedir. 2 günlük 2,233 g/cm³ ölçülen birim ağırlık, 7.günde 2,236 g/cm³'e, 28.günde 2,246 g/cm³'e çıkmış ve 56.günde 2,253 g/cm³ olmuştur.

Katkılı harç numunelerinin birim ağırlık değerlerine bakıldığında, 2.günde en yüksek birim ağırlık değeri 2,245 g/cm³ ile C2'ye aittir. 7 gün sonunda 2,240 g/cm³ 'e düşen bu değer, 28.günde tekrar 2,245 g/cm³ olmuş, 56.günde ise 2,250 g/cm³ değerine yükselmiştir. T1'in birim ağırlığı 2.günden 28.güne artmış, 56.günde ise düşmüştür. C1'in birim ağırlığı ise, T1'in tam tersine, 2.günden 28.güne düşmüş, 56.günde ise yükselmiştir. U1 ve U2'nin birim

ağırlıklarında 56.güne kadar kayda değer bir değişiklik gözlenmemiş, 56.günde ise artış olmuştur. T2'nin birim ağırlığında ise kayda değer bir değişiklik gözlenmemiştir.

Tablo 4.3. Birim ağırlık deneyi sonuçları.

Numune Kodu	Birim Ağırlık (g/cm ³)			
	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün
R	2,233	2,236	2,246	2,253
T1	2,224	2,229	2,233	2,227
T2	2,227	2,228	2,227	2,227
U1	2,241	2,241	2,242	2,247
U2	2,221	2,221	2,221	2,227
C1	2,241	2,240	2,238	2,245
C2	2,245	2,240	2,245	2,250



Şekil 4.3. Birim ağırlık deneyi sonuçları

4.2.5. Basınç Dayanımı Deneyi

Numunelerin 2, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı sonuçları sırasıyla Tablo 4.3. , Tablo 4.4. , Tablo 4.5. ve Tablo 4.6.'da verilmiştir. Buna ek olarak, ölçüm yapılan günlere ait ortalama basınç dayanımları Tablo 4.7.'de ve Şekil 4.3.'te görülmektedir.

Tablo 4.4. 2 günlük basınç dayanımı değerleri.

Numune	2 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)								
	I	II	III	IV	V	VI	Ortalama	Standart Sapma	Değişkenlik Katsayısı
R	29,7	28,5	29,7	28,3	28,2	27,8	28,7	0,74	0,026
T1	21,9	21,9	21,2	21,8	21,1	21,0	21,5	0,39	0,018
T2	20,3	19,9	19,9	20,3	19,8	19,3	19,9	0,34	0,017
U1	20,2	21,0	21,2	21,6	21,8	21,6	21,2	0,53	0,025
U2	19,4	19,9	20,5	19,3	20,0	19,2	19,7	0,46	0,023
C1	20,5	20,2	20,4	21,2	21,6	21,1	20,8	0,50	0,024
C2	20,9	19,7	20,5	18,6	18,5	18,4	19,4	1,00	0,051

Tablo 4.5. 7 günlük basınç dayanımı değerleri.

Numune	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)								
	I	II	III	IV	V	VI	Ortalama	Standart Sapma	Değişkenlik Katsayısı
R	41,9	42,4	40,7	42,7	41,1	41,5	41,7	0,70	0,017
T1	30,9	31,2	31,6	32,1	32,4	31,5	31,6	0,51	0,016
T2	29,2	29,2	29,1	29,8	29,6	27,0	29,0	0,92	0,032
U1	33,1	32,9	32,7	32,6	33,4	33,0	33,0	0,26	0,008
U2	28,7	29,5	28,4	30,1	29,0	29,5	29,2	0,57	0,019
C1	32,4	33,5	31,8	32,6	32,0	32,1	32,4	0,56	0,017
C2	30,0	30,5	30,5	30,8	30,3	30,3	30,4	0,24	0,008

Tablo 4.6. 28 günlük basınç dayanımı değerleri.

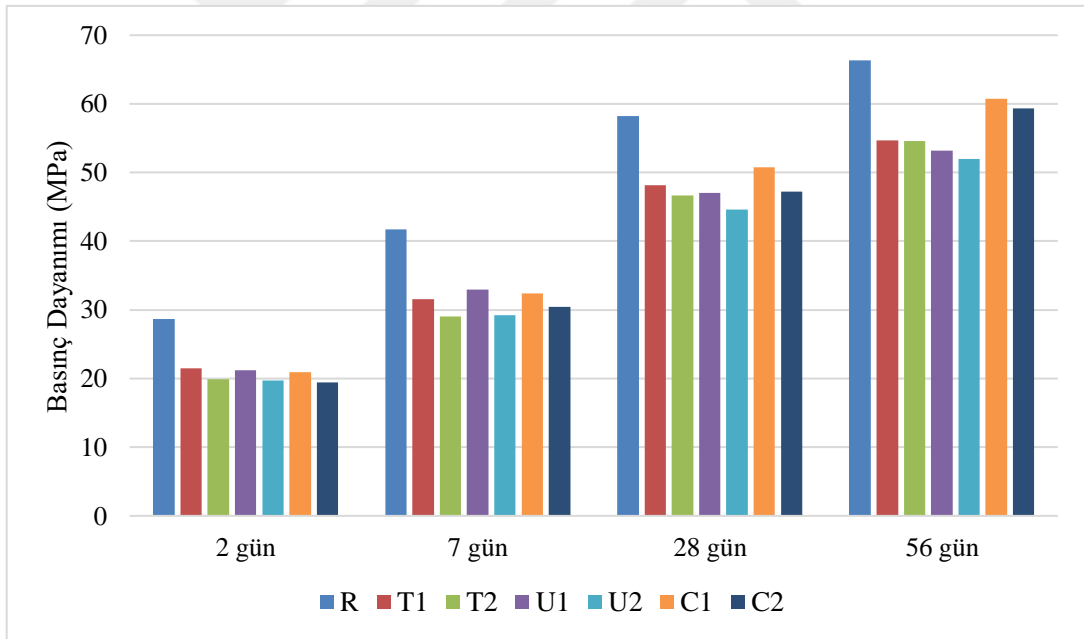
Numune	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)								
	I	II	III	IV	V	VI	Ortalama	Standart Sapma	Değişkenlik Katsayısı
R	59,7	58,9	56,7	57,6	58,3	58,1	58,2	0,95	0,016
T1	47,6	47,8	48,6	48,6	48,4	48,2	48,2	0,38	0,008
T2	45,9	47,0	47,3	46,5	46,8	46,7	46,7	0,44	0,009
U1	46,5	47,2	46,0	48,2	47,2	47,1	47,0	0,68	0,014
U2	43,4	45,4	43,6	45,9	44,8	44,5	44,6	0,90	0,020
C1	51,8	48,8	51,9	50,8	50,4	50,9	50,8	1,03	0,020
C2	46,4	48,0	45,8	48,6	47,4	47,1	47,2	0,94	0,020

Tablo 4.7. 56 günlük basınç dayanımı değerleri.

Numune	56 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)								
	I	II	III	IV	V	VI	Ortalama	Standart Sapma	Değişkenlik Katsayısı
R	64,3	66,5	65,9	68,2	65,5	67,2	66,3	1,24	0,019
T1	54,2	54,8	55,5	53,6	54,6	55,5	54,7	0,68	0,012
T2	55,1	53,9	54,9	55,6	53,7	54,6	54,6	0,66	0,012
U1	52,8	53,1	53,9	52,6	53,8	52,7	53,2	0,52	0,010
U2	51,0	52,4	50,8	52,6	51,3	53,8	52,0	1,06	0,020
C1	57,8	60,0	62,1	61,7	62,7	59,6	60,7	1,69	0,028
C2	59,4	60,3	57,6	58,5	58,8	61,1	59,3	1,16	0,020

Tablo 4.8. Ortalama basınç dayanımı değerleri.

Numune	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)			
	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün
R	28,7	41,7	58,2	66,3
T1	21,5	31,6	48,2	54,7
T2	19,9	29,0	46,7	54,6
U1	21,2	33,0	47,0	53,2
U2	19,7	29,2	44,6	52,0
C1	20,9	32,4	50,8	60,7
C2	19,4	30,4	47,2	59,3

**Şekil 4.4.** Ortalama basınç dayanımı değerleri.

Numunelerin basınç dayanımı deney sonuçlarına 2.gün için en yüksek dayanım değeri T1'e aittir. 21,5 MPa olan bu değeri 21,2 MPa ile U1 takip etmektedir. En düşük dayanım ise 19,4 MPa ile C2'ye aittir.

2.günden 7.güne basınç dayanımı değişimlerine bakıldığında, en yüksek artış %56,7'lik oranla C2'ye ait dayanımda olmuştur.

7.gün basınç dayanımı sonuçlarına göre en yüksek dayanım 33,0 MPa ile U1'e aittir. 32,4 MPa basınç dayanımı değeriyle C1 ise ikinci sıradadır.

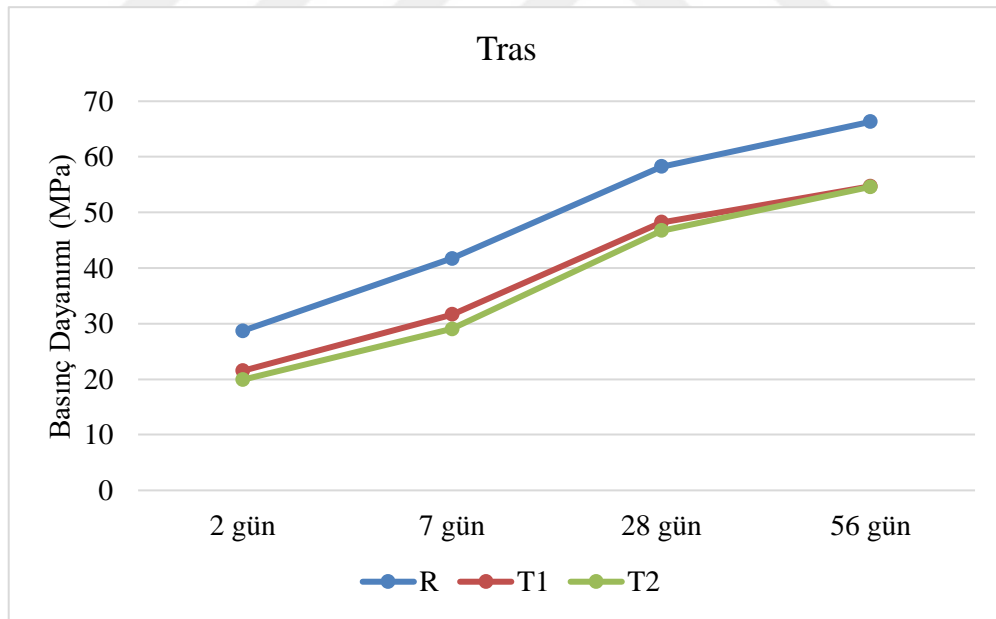
7.günden 28.güne en fazla artış T2'de görülmüştür. 7.günde 29 MPa ölçülen dayanım 28.günde 46,7 MPa'a ulaşmıştır.

28 günlük sonuçlara göre en yüksek değere sahip olan C1'in basınç dayanımı 50,8 MPa'dır. C1'e en yakın değer 48,2MPa ile T1'e aittir.

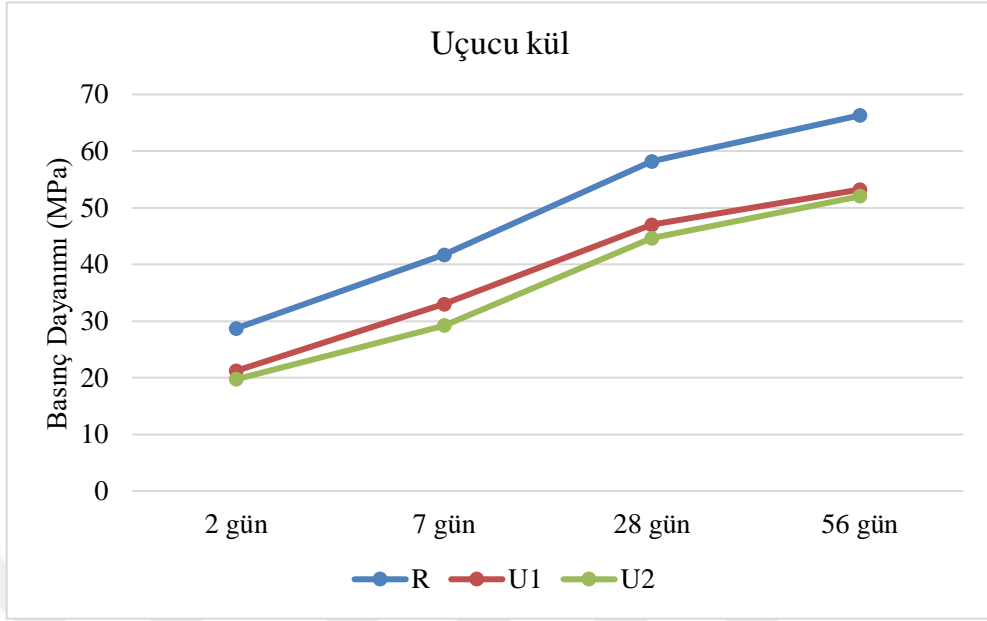
28.günden 56.güne en yüksek değişimi %25,64'lük oran ile C2 göstermiştir. 47,2 MPa olan basınç dayanımı 59,3 MPa'a çıkmıştır.

56 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre ise, en yüksek dayanım değeri C1'e aittir.

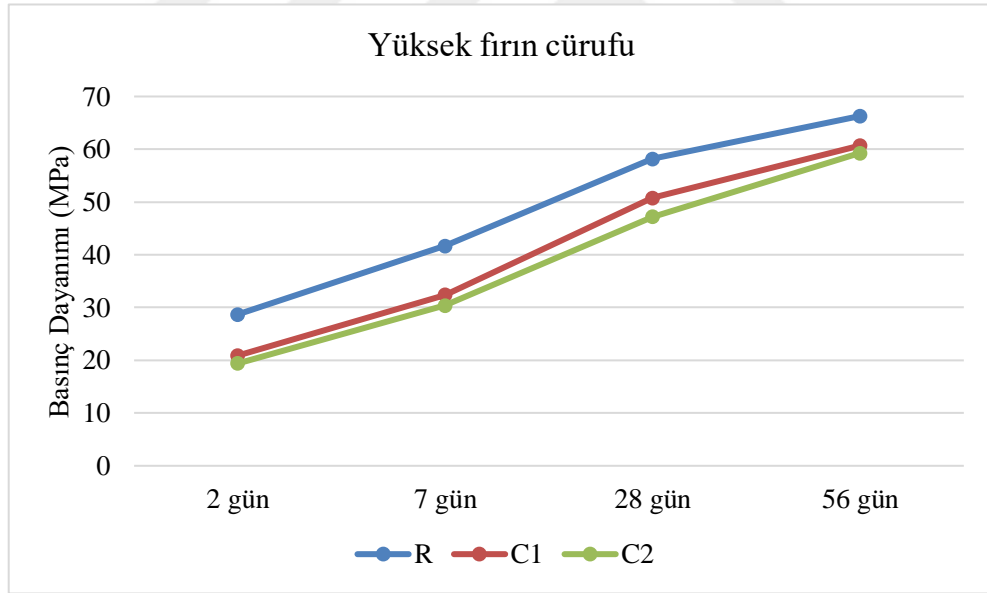
Puzolan gruplarının, kendi içlerinde, şahit numuneye göre basınç dayanımı değişimlerini gösteren grafikler Şekil 4.4., 4.5. ve 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.5. Tras ikameli harç numunelerinin basınç dayanımı değişimleri.



Şekil 4.6. Uçucu kül ikameli harç numunelerinin basınç dayanımı değişimleri.



Şekil 4.7. Yüksek fırın cürufu ikameli harç numunelerinin basınç dayanımı değişimleri.

Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, ölçüm yapılan bütün günlerde, en yüksek dayanım değeri şahit numuneye aittir. Puzolan katkılı harçların dayanım değerleri şahit numunenin değerine ulaşamamıştır.

TS EN 196-1 standardına göre, kullandığımız çimento tipi olan CEM I 42.5 R'nin 2 günlük erken dayanımının 20 MPa'a eşit veya büyük olması gerekmektedir. Şahit numuneye ait 2 günlük basınç dayanımı sonucu 28.7 MPa olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla kullandığımız çimento standartta belirtilen erken dayanım şartını sağlamaktadır. Yine aynı standart, CEM I 42.5 R sınıfı çimentonun 28 günlük basınç dayanımı değerinin minimum 42.5 MPa, maksimum 62.5 MPa olması gerektiğini belirtmektedir. Şahit numunenin 28 günlük basınç dayanımı 58.2 MPa ölçülmüş olup, verilen değerler arasındadır. İlgili standarda göre, puzolan katkılı harç numunelerimizin erken dayanım ve standart dayanım değerlerini sağlayıp sağlamadığını incelediğimizde, T1, U1 ve C1'in dayanım değerlerinin istenilen aralıkta olduğu görülmektedir. T2, U2 ve C2 numunelerinde ise, standart dayanım değeri gereği sağlanmış, erken dayanım değeri ise küçük farklarla sınır değerinin altında kalmıştır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada CEM I 42.5 R sınıfı çimento ile beraber altı çeşit puzolan kullanılmıştır. Gerek kullanılan çimento ve puzolanlar da , gerekse üretilen harçlarda fiziksel ve kimyasal analizler yapılmıştır.

Çimento üzerinde yapılan fiziksel ve kimyasal analizler sonucunda, kullanılan çimentonun TS EN 197-1 standardında CEM I 42,5 R sınıfı çimentolar için öngörülen şartları sağladığı görülmüştür.

Puzolanların tespit edilen fiziksel özellikleri göstermiştir ki, en yüksek özgül ağırlık değeri Karçimsa yüksek fırın cürufuna, en düşük özgül ağırlık değeri ise Tunçbilek uçucu külüne aittir. Bununla birlikte, en yüksek özgül yüzey değeri Ladik trasında, en düşük özgül yüzey değeri ise İçdaş uçucu külünde görülmüştür.

Puzolanlar, içeriklerinde bulunan toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranlarına göre incelendiğinde, en yüksek değer İçdaş uçucu külüne, en düşük değer ise Oyak Ereğli yüksek fırın cürufuna aittir. TS 25 standardına göre doğal puzolanın içeriğinde bulunması gereken toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranı minimum %70 olmalıdır. Buna göre kullanılan Şile trası ve Ladik trasının standartta belirtilen bu şarta uygun oldukları söylenebilir.

SO_3 oranları incelendiğinde, en yüksek değer Oyak Ereğli yüksek fırın cürufuna, en düşük değer ise Şile trasına aittir. TS 25 standardına göre doğal puzolanın içeriğinde bulunması gereken SO_3 oranı maksimum %3,0 olmalıdır. Buna göre %0,12 oranına sahip Şile trası ile %0,49 oranına sahip Ladik trasının bu şartı sağladığı görülmektedir.

Puzolanları içeriğinde bulunan klorür oranına göre sıraladığımızda, en yüksek orana sahip puzolan Karçimsa yüksek fırın cürufu, en düşük orana sahip puzolan ise İçdaş uçucu küdür. TS 25 standardına göre, doğal puzolanın içeriğinde bulunması gereken klorür oranı maksimum %0,1 olmalıdır. Şile trası ile Ladik trasının bu şartı sağladığı görülmektedir.

Reaktif silis miktarı Şile trasında %22,72, Ladik trasında %15,29 ölçülmüştür. TS 25 standardı, doğal puzolanın içeriğinde minimum %25 oranında reaktif silis bulunması gerektiğini belirtmektedir. Buna göre, bu çalışmada kullanılan Şile trası ve Ladik trasının bu şartı sağlamadığı görülmektedir.

Puzolanlar hakkında bir genelleme yapılacak olursa, iyi bir puzolanın açık renkli, konsolide ve homojen bir yapıda, ve ortalama $2.00-2.30 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta olduğu söylenebilir. Puzolanların mineralojik bileşimi değerlendirildiğinde, camsı faz ve alkali feldspat miktarlarının yüksek, kil minerallerinin ise düşük olması beklenir. İyi bir puzolanın kimyasal bileşimi incelendiğinde ise, $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ miktarının %80, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ miktarının %5, çözünmeyen kalıntı yüzdesinin %80, ve kızdırma kaybının en fazla %8 civarında olması istenir. $\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının %8'i, Fe_2O_3 miktarının ise %6'yı geçmemesi gerekir. Puzolanları bu şartlara göre değerlendirdiğimizde, yoğunluk değeri ve $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ miktarı şartı haricindeki bütün şartları sağlayan tek puzolanın Ladik trası olduğu görülmektedir.

Harçlara ait fiziksel özellikler incelendiğinde, puzolan katkısının normal kıvam için gerekli su miktarını arttırdığı, Tunçbilek uçucu külü haricindeki puzolanların ise priz süresini uzattığı, hacim genleşmesinin değişmediği, puzolan ikamesinin özgül ağırlık değerini düşürdüğü, Ladik trası, Şile trası ve Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu ikamesinin özgül yüzeyi arttırdığı, diğer puzolanların ikamesinin ise özgül yüzey değerini düşürdüğü söylenebilir.

Harçların kimyasal özellikleri incelendiğinde, çözünmeyen kalıntı yüzdesini Karçimsa yüksek fırın cürufu ikamesinin düşürdüğü, Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu ikamesinin sabit kalmasını sağladığı, diğer puzolanların ise bu oranı yükselttiği tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar puzolan ikamesinin SiO_2 ve Al_2O_3 oranını arttırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek fırın cüruflarının ikamesi Fe_2O_3 oranını düşürmüştür, Ladik trası ikamesi oranın sabit kalmasını sağlamış, diğer puzolanlar ise Fe_2O_3 oranını arttırıcı yönde etki yapmıştır.

CaO ve MgO oranları incelendiğinde, puzolan ikamesinin, CaO oranını düşürdüğü, MgO oranını ise yükselttiği görülmektedir. Aynı şekilde, şahit numunenin SO_3 ve klorür oranları puzolan ikamesi ile azalmıştır.

Tunçbilek uçucu külü Na_2O oranını düşürmüştür, yüksek fırın cürufları bu oranın sabit kalmasını sağlamış, diğer puzolanlar ise bu oranı yükseltmiştir. K_2O oranı ise puzolan ikamesi ile artış göstermiştir.

Kızdırma kaybı oranı Tunçbilek uçucu külü ve yüksek fırın cürufu ikamesi ile azalmış, diğer puzolanların ikamesi ile yükselmiştir. Serbest CaO oranı ise puzolan ikamesi ile düşmüştür.

TS EN 196-5 standardına uygun olarak yapılan puzolanik özellik deney sonuçlarına göre, bütün puzolanlar, puzolanik özellik olarak yeterli bölgededir.

TS 25 standardına göre gerçekleştirilen puzolanik aktivite deneyi sonuçlarına göre, bütün puzolanların, standartta belirtilen minimum 4 MPa'lık 7 günlük basınç dayanımına sahip olma şartını sağladığı görülmüştür. Puzolanik aktivite değerlerine göre büyükten küçüğe yapılan sıralamada, ilk sırada yüksek fırın cürüfları yer almakta, daha sonra ise uçucu küller ve traslar gelmektedir. Yüksek fırın cürüfları arasındaki sıralama, büyükten küçüğe, Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu ve Karçimsa yüksek fırın cürufu şeklindedir. En düşük puzolanik aktiviteye sahip olan grup traslar, en düşük puzolanik aktiviteye sahip olan puzolan ise Ladik trasıdır.

Puzolanik özellikleri ve puzolanik aktiviteleri ilgili standartlara göre belirlenen puzolanlar, çimentoya ağırlıkça %20 oranında ikame edilerek harç numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu numunelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri ölçülerek, % 100 çimento ile üretilen harç numunesinin ölçülen değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, puzolanların puzolanik aktivitelerine göre, ölçülen bu özelliklerin nasıl değişiklik gösterdiği, yani puzolanik aktivitelerin bu özellikler üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Hidratasyon ısı ölçüm sonuçlarına göre, puzolan katkılı bütün numunelerin hidratasyon ısılarının 1. ve 3. günlerde şahit numuneye göre daha düşük olduğu görülmüştür. 7. ve 28. günlerde ise, yüksek fırın cürufu katkılı numuneler şahit numuneden daha düşük hidratasyon ısı değerlerine sahiptirler. Cürüfların hidratasyonunun yavaş geliştiği bilinen bir gerçektir. Bununla birlikte, bu çalışmada kullanılan puzolanlar arasında en yüksek puzolanik aktivite değerleri de yine yüksek fırın cürularında görülmüştür. Elde edilen bu bilgiler ışığında puzolanların hidratasyon ısını düşürdüğü, puzolanik aktivitenin de bu düşüşte rol oynadığı söylenebilir.

Sertleşmiş harç numunelerinin 2.günden 56.güne birim ağırlık değerlerine bakıldığında; Ladik trası ikameli harç numunesinin 28.güne kadar şahit numuneye benzer özellik gösterdiği, birim ağırlık değerinde artış olduğu görülmüştür. Söz konusu numunenin birim ağırlık değeri 28.günden 56.güne düşüş göstermiştir. Buna karşılık, Oyak Ereğli yüksek fırın cürufu ikameli harcın birim ağırlık değeri ise 2.günden 28.güne düşüş göstermiş, 28.günden 56.güne de yükselmiştir. Karçimsa yüksek fırın cürufu ikameli harcın birim ağırlık değeri 2.günden 7.güne düşüş gösterirken, 28.günde tekrar 2.gün değerine ulaşmış, 28.günden 56.güne ise artış

göstermiştir. Uçucu kül ikameli harçların birim ağırlıklarında 28.güne kadar kayda değer bir değişim gözlenmezken, 28.günden 56.güne artış olmuştur. Şile trası ikameli harç ise 56.güne kadar birim ağırlık değerini korumuştur. Bütün birim ağırlık sonuçları incelendiğinde, şahit numuneye en yakın davranışı İçdaş uçucu külü göstermiştir denilebilir. Elde edilen sonuçlara göre, puzolanik aktivite ile birim ağırlık değerleri arasında bir bağlantı kurulamamıştır.

Harç numuneleri üzerinde yapılan basınç dayanımı deneyi sonuçlarına göre, bütün numunelerin dayanım değerleri 2.günden 56. güne artış göstermiştir. Ancak, şahit numunenin basınç dayanımı sonuçlarının katkılı numunelerinkinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 2.günden 7.güne basınç dayanımı değerlerinin % değişimine bakıldığında, en yüksek değişim oranının %56,7 ile Karçimsa yüksek fırın cürufuna ait olduğu görülmüştür. Değerlerde 7.günden 28.güne en yüksek değişim oranı Şile trasına, 28.günden 56.güne en yüksek değişim oranı ise Karçimsa yüksek fırın cürufuna aittir. Basınç dayanımı değerlerinin 2.günden 56.güne toplam değişim oranlarına bakıldığında ise, ilk sırada %205,67'lik artış ile Karçimsa yüksek fırın cürufu yer almaktadır.

Numunelerin basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, ölçüm yapılan bütün günlerde, en yüksek dayanım değerine şahit numunenin sahip olduğu görülmektedir. Puzolan katkılı harçların dayanım değerleri şahit numune değerlerine ulaşamamıştır. Bununla birlikte, bütün numuneler TS EN 196-1 standardında belirtilen standart dayanım değeri şartını sağlamaktadır. Yine aynı standartta belirtilen erken dayanım şartını ise, Tunçbilek uçucu külü, Şile trası ve Karçimsa yüksek fırın cürufu katkılı harçlar haricindeki bütün numunelerin sağladığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre, puzolanik katkı kullanmamızdaki amaç eğer TS EN 196-1 standardında verilen basınç dayanımı değeri şartlarını sağlamak ise, hem erken dayanım hem de standart dayanım şartını sağlayan İçdaş uçucu külü, Ladik trası ve Oyak Ereğli yüksek fırın cürufunun CEM I 42.5 R çimentosu yerine kullanılabileceği söylenebilir.

Cürufların hidratasyonunun yavaş geliştiği, geç hidrate oldukları için de erken yaşlardaki mukavemet gelişim oranlarının düşük olduğu bilinen bir gerçektir. Puzolanik aktivite bakımından ikinci en yüksek değere sahip olan Karçimsa yüksek fırın cürufunun standartta belirtilen erken dayanım şartını sağlamaması, tolere edilebilir çok küçük bir farkla standart değerinin altında kalması bu nedene bağlanabilir. Öte yandan, bu çalışmada kullanılan puzolanlar arasında en yüksek puzolanik aktiviteye sahip Oyak Ereğli yüksek fırın cürufunun

standartta belirtilen bütün dayanım şartlarını sağladığı, hatta 28. ve 56. günlerde şahit numuneye en yakın basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu bilgiler ışığında puzolanik aktivitenin basınç dayanımı değerine olumlu yönde katkı yaptığı söylenebilir.



KAYNAKLAR

- 1) Çelebi, G. ve Aydın, A.B., “Sürdürülebilir Mimarlık Yaklaşımında Yapı Malzemelerinin İrdelenmesi”, IV. Ulusal Ekoloji ve Çevre Kongresi, Bodrum, 457 - 464, 2001.
- 2) Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y., “Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri”, 2.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu Bidiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 263-275, 12-13 Nisan 2007.
- 3) TS 25, “Doğal Puzolan(Tras) – Çimento ve Betonda Kullanılan – Tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Aralık 2008
- 4) Erdoğan, T. Y., Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 2004.
- 5) ASTM C 618, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete,” Annual Book of ASTM Standards, 1994 274
- 6) Erdoğan, T. Y., Admixtures for Concrete, Middle East Technical University Press, Ankara, 1997.
- 7) Cook, D. J., “Natural Pozzolanas,” Concrete Technology and Design, Vol. 3, Cement Replacement Materials, Surrey University Press, 1986, p.2.
- 8) Price, W. H., “Pozzolans - A Review,” Journal of the American Concrete Institute, May 1975, pp.225-234.
- 9) Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y., Sorular ve Yanıtlarıyla Beton, Türkiye Hazır Beton Birliği, 2006.
- 10) Gutt, W. and Nixon, P. J., “Use of Waste Materials in the Construction Industry,” Materials and Structures, No.70, July-August 1979, pp.255- 306.
- 11) Ramachandran, V. S., Concrete Admixtures Handbook, Second Edition, Noyes Publication, New Jersey, U.S.A., 1995.

- 12) Mielenz, R. C., "Mineral Admixtures - History and Background," Concrete International, ACI, Aug. 1983, pp. 34-42.
- 13) Ün, H., Yapı Malzemeleri Ders Notları, PAÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli, 2007.
- 14) Bulut, Ü., Perlitin Puzolanik Aktivitesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- 15) Erdogan, T.Y., Beton, METU Press, Ankara, 2003.
- 16) Gani, M. S. J., "Cement and Concrete", Faculty of Engineering Monash University Clayton, Victoria, Australia, 1997, pp.83-90.
- 17) Gündeşli, U., Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2008.
- 18) Okucu, A., Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Balıkesir, 1998, 1-54s.
- 19) Lane, R. O. and Best, J. F., "Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete," Concrete International, ACI, July 1982, pp.81-92.
- 20) Leckebush, R., "Türkiye'deki Doğal Puzolanların Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımı", Çimento Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Ankara, 1984, p.1-10.
- 21) Blanks, R.F. ve Kennedy, H.L., Technology of Cement and Concrete, Vol. 1, USA, 1955.
- 22) Erdoğan, T. Y., "Strength Properties of Low-Lime and High-Lime Fly Ash Concretes," Proceedings, Ninth International Ash Use Symposium, Vol.1, Jan. 1991, pp.16-1 to 16-12. 275
- 23) Dayı M., Doğal ve Yapay Puzolanların Kompoze çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2006, 77s.

- 24) Erdoğan, T. Y., "High-Lime Fly Ash Concretes," Proceedings, Cairo First International Conference on Concrete Structures, Vol.1, Jan. 1996, pp. 4-1 to 4-9.
- 25) Davis, R. E., Carlson, R. W., Kelly, J. W. and Davis, H. E., "Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash," ACI Journal, Proceedings, V.33, No.5, May-June 1937, pp.577-612.
- 26) Postacıoğlu, B., Bağlayıcı Maddeler, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 1986, p.5-38.
- 27) Cook, J. E., "Fly Ash in Concrete – Technical Considerations," Concrete International, ACI, Sept. 1983, pp.51-59.
- 28) Tokyay ve Erdoğan, 'Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar', TÇMB/AR-GE, Ankara, 975-8136-03-08, 2003.
- 29) Neville, A.M., Properties of Concrete, Pitman Publishing, 1987, pp.77-81.
- 30) Berry, E. E. and Malhotra, V. M., "Fly Ash for Use in Concrete - A Critical Review," Journal of the American Concrete Institute, March - April 1980, pp. 59-73.
- 31) Spellman, L. U., "Granulated Blast-Furnace Slag as a Mineral Admixture," Concrete International, ACI, July 1982, pp.66-71.
- 32) Mazlum F., Pirinç Kabuğu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul, 1989.
- 33) Erdoğan, T. Y., Öğütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, s. 1-13, 1995.
- 34) Tokyay, M., 2003. Cüruflla ve Cürufllu Çimentolar. Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu, TÇMB, Ankara, 47s.
- 35) Gemma, R. S., "Strength Development of Concrete with Rice-Husk Ash", Cement and Concrete Composites, 2005, pp.158-160.

- 36) Urhan, S., Silisin Alkali Ortamda Çözünmesine Etki Eden Faktörler, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento Bülteni, 28/286, Ankara, 1991, 15-21,.
- 37) Mielenz, R.C., Witte, L.P. and Glantz O.J., Efect of Calcination on Natural Pozzolans, Proceedings of Symposium on Use of Pozzolan Materials in Mortars and Concretes, San Francisco, 1949, 43-91.
- 38) Malhotra, V. M., Carette, G. G. and Sivasundaram, V., “Role of Silica Fume in Concrete: A Review,” Advances in Concrete Technology, CANMET-Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, 1992, pp.925- 991.
- 39) Shi, C. and Day, R., Comparison of Different Methods For Enhancing Reactivity of Pozzolans, Cement and Concrete Research, 31, 813- 818, 2001.
- 40) Malhotra, V. M. and Carette, G. G. “Silica Fume Concrete - Properties, Applications, and Limitations,” Concrete International, ACI, May 1983, pp.40-46.
- 41) Massazza, F., Puzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları, Seminer, TÇMB, Ankara, 1989, 41-79.
- 42) Shi, C., Activation of Natural Pozzolans, Fly Ashes and Blast Furnace Slag, PhD Thesis; The University of Calgary, Canada, 1992.
- 43) Mehta, P. K., “Condensed Silica Fume,” Cement Replacing Materials, Vol.3, Surrey University Press, 1986, pp.136, 137.
- 44) TS EN 197-1 “Genel Çimentolar- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, 2012.
- 45) Ölmez, H., “Endüstriyel Tarımsal Atıkların Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi”, On Dokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları Fen Edebiyat Fakültesi, Samsun, 1988, 80 s.
- 46) Cook, D. J., “Rice Husk Ash,” Concrete Technology and Design, Vol.3, Cement Replacement Materials, Surrey University Press, 1986, pp. 171- 196.

- 47) Aruntaş, H.Y., “Mineral Esaslı Bağlayıcılar Notları”, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi A.B.D., 2007.
- 48) Akçansa, Teknik Notlar 3, Çimentonun Hidratasyonu.
- 49) TS EN 196-1 “Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, 2016.
- 50) Regourd, M., Structure and Behaviour of Slag Portland Cement Hydrates, Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cements, **I**, 11-26, Paris, 1980.
- 51) Lea., F.M., “Investigations on Pozzolans”, Building Research, 27: 1-63, 1940.
- 52) Yalçın, H. ve Gürü, M., “Çimento ve Beton” Palme Yayıncılık, p. 17, 18, 20, 35-38, 40-42, 2006.
- 53) Kaminski, M., Zielenkiewicz, W., The heats of hydration of cement constituents, Original Research Article Cement and Concrete Research, Vol. 12, Issue 5, 549-558, 1982.
- 54) Yeğınobalı, A. ve Ertün, T., “Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar”, Ar-Ge Enstitüsü Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara 9, 10, 20-23, 2004.
- 55) Erdoğan, T., Türkiye’de Üretilen Çimentolar, Özellikleri ve Kullanımları, TMMB, İnşaat Mühendisleri Odası Çimento Sempozyumu, 16–27 Kasım, Ankara, 1995.
- 56) Erdoğan, T.Y., Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Özkan Matbaacılık Gaz. San. ve Tic. Şti., Ankara, Mart 2007, 975-7064-67-X.
- 57) Poole, T., Revision of test methods and specifications for controlling heat of hydration in hydraulic cement, SN3007, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 42, 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Duygu EREN
Doğum Yeri	Pazarköy/Çanakkale
Doğum Tarihi	01.01.1985
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	05433854355
E-Posta Adresi	duygukayaeren@gmail.com



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Kimya Mühendisliği Bölümü
Mezuniyet Yılı	16.06.2009

Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği Bölümü
Mezuniyet Yılı	18.02.2011

Lisans	
Üniversite	Anadolu Üniversitesi
Fakülte	İşletme Fakültesi
Bölümü	İşletme Bölümü
Mezuniyet Yılı	10.09.2012

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Eğitim Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği Programı