

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI PUZOLANİK KATKILAR İLE HAZIRLANAN  
HORASAN HARÇLARININ DEĞİŞEN PARAMETRELERİNİN  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Ülkü Aylin MAVİOĞLU**

**Anabilim Dalı : Mimarlık**

**Programı : Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa Erkan KARAGÜLER**

**HAZİRAN 2011**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI PUZOLANİK KATKILAR İLE HAZIRLANAN  
HORASAN HARÇLARININ DEĞİŞEN PARAMETRELERİNİN  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Ülkü Aylın MAVİOĞLU  
(502081516)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2011**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mustafa Erkan KARAGÜLER  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nihal ARIOĞLU  
Prof. Dr. Halit Yaşa ERSOY**

**HAZİRAN 2011**



## ÖNSÖZ

Tez sürecimde değerli bilgileri, çalışmama yön vermesi, yardımları ve desteğinden dolayı, sayın tez danışmanım Doç. Dr. Mustafa Erkan Karagüler'e, çalışmamı destekleyen ve analizlerimde yardımcı olan Araş. Gör. Serkan Yatağan'a, laboratuvar çalışmalarımnda bana yardım eden teknisyen İbrahim Öztürk'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte yardımlarını eksik etmeyen sevgili arkadaşlarıma, desteğinden ötürü Ali Pekiüreke'e ve bugüne kadar hep yanımda olmuş aileme teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Mayıs 2011

Ülkü Aylin Mavioğlu  
Mimar



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>v</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı .....	1
1.2 Çalışmanın Önemi .....	2
1.3 Çalışmanın Yöntemi .....	3
<b>2. HARÇLAR</b> .....	<b>5</b>
2.1 Harçların Özellikleri ve Yapılardaki Kullanımı .....	5
2.2 Harç ve Sıva Malzemeleri .....	7
2.2.1 Bağlayıcılar .....	7
2.2.1.1 Kireç .....	7
2.2.1.2 Alçı .....	10
2.2.1.3 Çimento-portland çimentosu .....	11
2.2.1.4 Puzolanlar .....	12
2.2.2 Dolgu malzemeleri .....	15
2.2.3 Katkı malzemeleri .....	16
2.3 Hammaddelerine Göre Tarihi Yapı Harçları .....	16
2.3.1 Çamur ve alçı harçları .....	17
2.3.2 Kireç harçları.....	18
2.3.2.1 Horasan harçları .....	19
<b>3. HORASAN HARÇLARININ ÖZELLİKLERİ</b> .....	<b>21</b>
3.1 Horasan Harçlarının Tarihçesi ve Kullanım Teknikleri .....	21
3.2 Horasan Harcının Teknik Özellikleri.....	22
<b>4. HORASAN HARÇLARININ ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>27</b>
4.1 Deney Programı .....	27
4.2 Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması: Ön Deneyler.....	30
4.2.1 Agreganın özellikleri.....	30
4.2.1.1 Özgül ağırlık tayini.....	30
4.2.1.2 Elek analizi .....	31
4.2.1.3 Birim hacim ağırlık tayini .....	33
4.2.2 Kirecin özellikleri.....	34
4.2.2.1 Özgül ağırlık tayini.....	34
4.2.2.2 Su oranı tayini .....	34
4.2.3 Puzolanın özellikleri.....	34
4.2.3.1 Kimyasal özellikleri.....	35

4.2.3.2 Fiziksel özellikler .....	35
4.3 Harç Karışım Oran ve Özellikleri .....	37
4.4 Deneyler .....	41
4.4.1 Rötire deneyi .....	41
4.4.2 Ultrases hızı deneyi .....	41
4.4.3 Fiziksel deneyler .....	44
4.4.3.1 Kılcallık deneyi.....	44
4.4.3.2 Su emme deneyi.....	45
4.4.3.3 Birim hacim ağırlık deneyi (görünür yoğunluk).....	46
4.4.3.4 Açık gözeneklilik.....	47
4.4.3.5 Özgül ağırlık deneyi (gerçek yoğunluk).....	47
4.4.3.6 Buhar geçirgenlik deneyi.....	47
4.4.4 Mekanik deneyler .....	50
4.4.4.1 Eğilme ve basınç dayanım deneyleri.....	50
4.4.5 Kimyasal deneyler .....	52
4.4.5.1 Asit kaybı analizi .....	52
4.4.5.2 Asit kaybı sonrası elek analizi .....	54
4.4.5.3 Kızdırma kaybı analizi.....	55
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ</b> .....	<b>57</b>
5.1 Rötire Deneyinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	57
5.2 Ultra Ses Deneyi ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	59
5.3 Fiziksel Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	61
5.4 Mekanik Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	67
5.5 Kimyasal Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	71
<b>6. SONUÇLAR.....</b>	<b>79</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>83</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>87</b>
<b>EK A.....</b>	<b>89</b>
<b>EK B.....</b>	<b>105</b>



## KISALTMALAR

<b>ASTM</b>	:American Society for Testing Materials
<b>KH1</b>	:Kireç + tuğla kırığı + dere kumu harcı, 1:2 oranlı karışım
<b>KH2</b>	:Kireç + tuğla kırığı + dere kumu harcı, 1:3 oranlı karışım
<b>KH3</b>	:Kireç + tuğla kırığı + dere kumu harcı, 1:4 oranlı karışım
<b>KPTTH1</b>	:Kireç + ponza taşı tozu + tuğla kırığı + dere kumu harcı, 1:2 oranlı karışım
<b>KPTTH2</b>	:Kireç + ponza taşı tozu + tuğla kırığı + dere kumu harcı, 1:3 oranlı karışım
<b>KPTTH3</b>	:Kireç + ponza taşı tozu + tuğla kırığı + dere kumu harcı, 1:4 oranlı karışım
<b>KTTH1</b>	:Kireç + tuğla tozu tozu + tuğla kırığı + dere kumu harcı, 1:2 oranlı karışım
<b>KTTH2</b>	:Kireç + tuğla tozu tozu + tuğla kırığı + dere kumu harcı, 1:3 oranlı karışım
<b>KTTH3</b>	:Kireç + tuğla tozu tozu + tuğla kırığı + dere kumu harcı, 1:4 oranlı karışım
<b>RILEM</b>	:The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures
<b>TS</b>	:Türk Standardları



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 3.1:</b> Bazı Roma ve Osmanlı dönemi harçlarında kullanılan tuğla agregaların tespit edilen metal oksit yüzdeleri (Uğurlu & Böke, 2010).....	24
<b>Çizelge 4.1 :</b> Agregası karışımının (tuğla kırığı+dere kumu) tane boyut dağılım yüzdesi. ....	33
<b>Çizelge 4.2 :</b> Doğal puzolanın kimyasal özellikleri ve gerekler (TS 25, 2008). ....	35
<b>Çizelge 4.3 :</b> Puzolanik aktivite analizi için kullanılması gereken malzeme miktarları (TS 25, 2008). ....	36
<b>Çizelge 4.4 :</b> Kireç-doğal puzolan karışımı ile hazırlanan deney numunelerin 7 günlük basınç dayanımı (TS 25, 2008).....	37
<b>Çizelge 4.5 :</b> Ponza tozu + Kireç harcı 7. gün eğilme ve basınç dayanım değerleri / Tuğla tozu + Kireç harcı 7. gün eğilme ve basınç dayanım değerleri. ...	37
<b>Çizelge 4.6 :</b> Harç karışım oranları (ağırlıkça). ....	39
<b>Çizelge 4.7 :</b> Harç karışım miktarları. ....	40
<b>Çizelge 4.8 :</b> Sıcaklığa ve neme bağlı doymuş su buharı ve basınç değerleri. ....	50
<b>Çizelge 5.1 :</b> Ultra ses hızı deneyi toplu sonuçları.....	60
<b>Çizelge 5.2 :</b> Fiziksel deneylerin toplu sonuçları. ....	62
<b>Çizelge 5.3 :</b> Eğilme ve basınç dayanımı deneyi toplu sonuçları. ....	69
<b>Çizelge 5.4 :</b> 54-85 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları. ....	72
<b>Çizelge 5.5 :</b> 38-47 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları. ....	73
<b>Çizelge 5.6 :</b> 9-12 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları... ..	73
<b>Çizelge 5.7 :</b> Harç bileşenleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları.....	73
<b>Çizelge 5.8 :</b> Harçların kimyasal bağ suyu (H <sub>2</sub> O), CO <sub>2</sub> yüzdeleri ve CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O oranları_10 g harç numunesi ile yapılan deney sonuçları. ....	77
<b>Çizelge 5.9 :</b> Harçların kimyasal bağ suyu (H <sub>2</sub> O), CO <sub>2</sub> yüzdeleri ve CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O oranları_5 g harç numunesi ile yapılan deney sonuçları. ....	77
<b>Çizelge A.1 :</b> Puzolanik aktivite analizi-eğilme basınç dayanımı. ....	89
<b>Çizelge A.2 :</b> KH1 karışımı kılcallık deney çizelgesi. ....	90
<b>Çizelge A.3 :</b> KH1 karışımı su emme deney çizelgesi.....	90
<b>Çizelge A.4 :</b> KH2 karışımı kılcallık deney çizelgesi.....	91
<b>Çizelge A.5 :</b> KH2 karışımı su emme deney çizelgesi.....	91
<b>Çizelge A.6 :</b> KH3 karışımı kılcallık deney tablosu. ....	92
<b>Çizelge A.7 :</b> KH3 karışımı su emme deney çizelgesi.....	92
<b>Çizelge A.8 :</b> KPTTH1 karışımı kılcallık deney çizelgesi.....	93
<b>Çizelge A.9 :</b> KPTTH1 karışımı su emme deney çizelgesi. ....	93
<b>Çizelge A.10 :</b> KPTTH2 karışımı kılcallık deney çizelgesi.....	94
<b>Çizelge A.11 :</b> KPTTH2 karışımı su emme deney çizelgesi. ....	94
<b>Çizelge A.12 :</b> KPTTH3 karışımı kılcallık deney çizelgesi.....	95
<b>Çizelge A.13 :</b> KPTTH3 karışımı su emme deney çizelgesi. ....	95
<b>Çizelge A.14 :</b> KTTH1 karışımı kılcallık deney çizelgesi.....	96
<b>Çizelge A.15 :</b> KTTH3 karışımı su emme deney çizelgesi.....	96

Çizelge A.16 : KTTH2 karışımı kılcallık deney tablosu.....	97
Çizelge A.17 : KTTH2 karışımı su emme deney tablosu .....	97
Çizelge A.18 : KTTH3 karışımı kılcallık deney çizelgesi. ....	98
Çizelge A.19 : KTTH3 karışımı su emme deney çizelgesi.....	98
Çizelge A.20 : Buhar geçirgenlik deney tablosu.....	99
Çizelge A.21 : 54-85 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları. .....	100
Çizelge A.22 : 38-47 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları. .....	100
Çizelge A.23 : 9-12 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları. .....	101
Çizelge A.24 : 54-85 g harç numunesi elek analizi sonuçları.....	101
Çizelge A.25 : 38-47 g harç numunesi elek analizi sonuçları.....	102
Çizelge A.26 : 9-12 g harç numunesi elek analizi sonuçları.....	102
Çizelge A.27 : 10-15 g harç numuneleri üzerinde yapılan kızdırma kaybı analiz sonuçları.....	103
Çizelge A.28 : 4-5 g harç numuneleri üzerinde yapılan kızdırma kaybı analiz sonuçları.....	103

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Kireç harçlarının sınıflandırılması.....	19
Şekil 4.1 : Horasan harçlarının özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneysel çalışma şeması.....	29
Şekil 4.2 : Dere kumun granülometri eğrisi.....	32
Şekil 4.3 : Tuğla kırığının granülometri eğrisi.....	32
Şekil 4.4 : Agreg a karışımının granülometri eğrisi.....	33
Şekil 4.5 : Röt re deney aleti.....	41
Şekil 4.6 : Laboratuar koşullarında ki test düzeneği (Bungey ve diğ, 2006).....	42
Şekil 4.7 : Ultrases hızı ölçüm cihazı.....	44
Şekil 4.8 : Buhar geçirgenlik deney numuneleri.....	48
Şekil 4.9 : Mettler H20 marka elektronik terazi.....	49
Şekil 4.10 : Eğilme ve basınç deney düzeneği.....	51
Şekil 5.1 : Röt re deneyi toplu sonuçları.....	58
Şekil 5.2 : Günlere göre ultra ses hızı değişim grafiği.....	60
Şekil 5.3 : Numunelere göre ultra ses hızı değişim grafiği.....	61
Şekil 5.4 : Kılcallık katsayısı deney sonuçları.....	62
Şekil 5.5 : Ağırlıkça su emme deneyi sonuçları.....	63
Şekil 5.6 : Hacimce su emme deneyi sonuçları.....	64
Şekil 5.7 : Birim hacim ağırlık deneyi sonuçları.....	65
Şekil 5.8 : Özgöl ağırlık deney sonuçları.....	65
Şekil 5.9 : Porozite oranı.....	66
Şekil 5.10 : Buhar geçirgenlik deney sonuçları.....	67
Şekil 5.11 : Eğilme dayanımı toplu sonuçları.....	70
Şekil 5.12 : Basınç dayanımı toplu sonuçları.....	70
Şekil 5.13 : 54-85 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analizi sonrası harç numunelerinin bağlayıcı/agrega dağılım yüzdeleri.....	74
Şekil 5.14 : 54-85 g harç agrega granülometri eğrisi.....	75
Şekil 5.15 : 38-47 g harç agrega granülometri eğrisi.....	75
Şekil 5.16 : 9-12 g harç agrega granülometri eğrisi.....	76
Şekil 5.17 : Harçların hidrolik özellik değerlerinin (CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O), CO <sub>2</sub> (%)’e bağlı değişimi_10 g harç numunesi ile yapılan deney sonuçları.....	78
Şekil 5.18 : Harçların hidrolik özellik değerlerinin (CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O), CO <sub>2</sub> (%)’e bağlı değişimi_5 g harç numunesi ile yapılan deney sonuçları.....	78
Şekil B.1 : Puzolanik aktivite için ponza taşı tozu ve tuğla tozu ile üretilmiş kireç harcı örnekleri.....	105
Şekil B.2 : 4x4x16cm lik prizmatik kalıplara dökülen harç numuneleri.....	105
Şekil B.3 : Buhar geçirgenlik deneyi için desikatörde bekletilen numuneler.....	106
Şekil B.4 : Kılcallık deneyi.....	106
Şekil B.5 : Su emme deneyi.....	107

<b>Şekil B.6</b> : Asit kaybı analizinde beher içerisinde asit ile reaksiyona giren harç numuneleri. ....	107
<b>Şekil B.7</b> : Asitte çözme işleminden sonra etüvde kurumaya bırakılan filtrelenen ve beherde kalan çözünmeyen kısım.....	108
<b>Şekil B.8</b> : Asit kaybı analizi sonrası asitte çözünmeyen kısmın elek analizi. ....	108
<b>Şekil B.9</b> : Kızdırma kaybı analizinde kröze içerisinde konulmuş öğütülmüş harç numuneleri. ....	109

## **FARKLI PUZOLANİK KATKILAR İLE HAZIRLANAN HORASAN HARÇLARININ DEĞİŞEN PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

### **ÖZET**

Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde, birçok tarihi yapının inşasında bağlayıcı olarak kireç, agrega olarak tuğla ve kiremit gibi pişmiş seramik malzemelerden oluşan harç ve sıvalar kullanılmıştır. Bu harç ve sıvalar ülkemizde, horasan harcı ve sıvaları olarak bilinmektedir. Hidrolik özelliklerinden dolayı ve yüksek dayanıma sahip oldukları için, horasan harçları ve sıvaları, sarnıç, su kuyusu, su kemeri ve hamam gibi su etkisine maruz kalan yapılarda kullanılmıştır.

Diğer yandan, ülkemizde gerçekleşmekte olan pek çok restorasyon uygulamasında, beyaz çimento içerisine pembe boya katılarak, yüzlerce yıllık geleneğin ürünü olan horasan harç ve sıvalarının yerine kullanılmaktadır. Hatalı ve geri dönüşü olmayan uygulamalar, tarihi yapıların özgün malzemelerinin yok olmasına ve bozulma sorunlarının artmasına neden olmaktadır. Bu tip problemleri engellemek amacıyla, özgün yapı malzemelerinin özelliklerinin bilinerek, bu malzemelere fiziksel, mekanik ve estetik olarak uyumlu tamir malzemelerin seçilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, koruma amaçlı üretilecek horasan harçların özelliklerini geliştirebilmek amacıyla, laboratuvar koşullarında farklı katkı maddeleri içeren horasan harcı numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan harçlarda, üç farklı seri oluşturulmuş, birinci seride bağlayıcı olarak saf kireç, agrega olarak tuğla kırığı ve dere kumu, ikinci ve üçüncü seride de aynı hammaddelerle ancak bağlayıcının bir miktarına karşılık olarak iki tip ince öğütülmüş puzolanik katkı maddesi eklenmiştir. Serilerde bağlayıcı/agrega oranları 1:2 ile 1:4 arasında farklılaşmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda, karışım bileşenlerine ve oranlarına göre, harcın fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, saf kireç, tuğla kırığı ve dere kumu ile üretilen horasan harçlarının, tuğla kırıklarının puzolanik özelliklerinden dolayı, hidrolik özellik gösterdikleri, düşük yoğunluklu ve yüksek dayanımlı harçlar oldukları belirlenmiştir. Bununla birlikte, iki farklı ince öğütülmüş puzolanik katkı maddesinin katılmasıyla

hazırlanan iki tür harçta mukavemetin daha hızlı arttığı ve bazı yapısal özelliklerin iyileştiği tespit edilmiştir. Hammadde kompozisyonlarını ve karışım oranlarını bildiğimiz harç numunelerinin, tespit edilen yapısal özelliklerinin sonuçları, uygulanan deneysel metodolojinin de test edilmesini sağlamıştır. Bulunan sonuçlar özgün horasan harçlarında bulunan sonuçlarla karşılaştırılmış ve koruma amaçlı üretilecek horasan harçlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin nasıl iyileştirileceği konusunda bir tespit çalışması yapılmıştır.



# **INVESTIGATION IN CHANGING PARAMETERS OF HORASAN MORTARS WITH DIFFERENT PUZZOLANIC SUBSTITUTES**

## **SUMMARY**

In Roman, Byzantine, Seljuk and Ottoman period, mortars and plasters produced by using lime as binder and crushed bricks or tiles as aggregates were used for many of structures. These mortars and plasters are called as “horasan” mortars and plasters in Turkey. Because of their hydraulic properties and high mechanical strengths, horasan mortars and plasters are commonly used in buildings exposed to damaging water effect like cisterns, wells, aqueducts, baths etc.

On the other hand, in many restoration projects carrying out or completed, mortars and plasters produced by adding pink colored additives into the cement have been used instead of the horasan mortars and plasters although they are the products of centuries old traditions. This inaccurate and irretrievable applications result with the disappearance of the original materials and increase of the deterioration problems of historic monuments.

In this study, with the aim of determining the properties of new repair horasan mortars, the horasan mortar specimens with different additives are produced in the laboratory conditions. In this work, three different series are generated. In the first series, pure lime as binder, crushed bricks and river sand as aggregates are added in the mortar mixture. In the second and third series, two different fine-grained puzzolanic materials as additives are substituted for the specific amount of lime. In three series, the binder and aggregate ratio changes between 1:2 and 1:4. As a result of the laboratory experimental works, changes on the physical, mechanical and chemical characteristics of mortars according to raw material compositions and proportions are investigated.

According to the results of the analysis, it is determined that horasan mortar specimens prepared with pure lime, crushed brick aggregates and river sand are porous, less dense and high-strength materials due to the puzzolanic activities of brick pebbles. Besides, it is defined that other two series formed with the substitution

of two different finer-grained pozzolanic additives have much higher mechanical strength values, and better structural characteristics. Apart from these, the detected results of mortar specimens that we produced with specific raw materials and different proportions provide testing the experimental methodology which is used. The results are compared with the existing results of the original mortars and an evaluation study is made about how the physical and mechanical properties of repair mortars could be improved.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Çalışmanın Amacı

Tarihi yapılar sadece birer mimari eser değil, bunun yanında ait oldukları uygarlığın, kültürün, geleneğin, önemli bir gelişmenin, tarihi bir olayın tanıklığını yapan özgün belgelerdir. Bu nedenle korunmalarındaki amaç ve tutum, onları bir sanat eseri olduğu kadar, tarihi bir belge olarak da korumak olmalıdır (The Venice Charter, 1964)

Anıtların koruma çalışmalarında yapıya ait tüm özgün değerlerin gelecek kuşaklara aktarılması gerekmektedir. Tarihi yapı malzemeleri ise bir yapının ait olduğu dönemin teknolojisini ve geleneklerini yansıtan özgün değerlerin bir parçasıdır. Bu nedenle tarihi yapı malzemeleri üzerinde yapılacak koruma ve onarım çalışmalarının kalıcı olması ve sürekliliğinin sağlanması oldukça önemlidir (The Venice Charter, 1964).

Bu amaçla, doğru koruma ve onarım müdahaleleri için, onarım malzemesi olarak kullanılacak malzemeler üzerinde detaylı çalışmalar yapılmalı, malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve özgün malzemeyle olan uyumları detaylı bir şekilde etüt edilmelidir.

Günümüzde ise, yetersiz analizlerin, tarihi koruma metotlarıyla ilgisi bulunmayan modern yöntemlerin ve özgün malzemelerle, yeni malzemeler arasındaki uyumsuzluğun sonucunda, tarihi yapıların orijinal malzemeleri yok olmaktadır.

Kireç ve tuğla kırığı kullanılarak hazırlanmış harç ve sıvalar tarihi yapıların inşasında sıklıkla kullanılmış önemli ve özgün yapı malzemeleridir. Ülkemizde, kireç harcına agrega olarak ilave edilen, harca hidrolik karakter kazandıran ve dayanımını arttıran tuğla, kiremit kırığı gibi pişmiş toprak ürünlerine “horasan” denilmektedir. Horasan kullanılarak hazırlanmış kireç harç ve sıvaları ise “horasan harç ve sıvaları” olarak adlandırılmaktadır (Akman ve diğ., 1986).

Bağlayıcı ve agrega çeşitleri, bağlayıcı/agrega oranları, tane boyut dağılımları ve benzeri parametreler, tarihi harçların karakter özelliklerini belirleyen en önemli

verilerdir. Bu verileri elde etmek amacıyla, tarihi yapılardan harç numuneleri temin ederek, bunların morfolojisini belirlemek amacıyla pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu noktada deneysel çalışmaların bir basamağı da, tarihi harçların incelenmesiyle elde edilen verileri kullanarak, aynı hammaddelerle veya bu hammaddelere farklı bileşenler ekleyerek özgün harçlarla uyumlu yeni harçlar üretmek olmalıdır. Bu adımda izlenecek yöntemler sonucunda, hem üretilen karışımlar tarihi harçlarla uyumlulukları açısından karşılaştırılacak, hem de hammadde kompozisyonları ve karışım oranları bilinerek hazırlanan harç numunelerinin tespit edilen yapısal özelliklerinin sonuçları, uygulanan deneysel metodolojinin test edilmesini sağlayacaktır.

Bu nedenle, onarım çalışmalarında kullanılmak üzere, tarihi yapı harçlarıyla uyumlu çalışabilecek harç üretilmesi ve bu harçların özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla, horasan harcına farklı puzolanik katkı maddelerinin ilave edilmesi ve bağlayıcı/agrega oranlarının değiştirilmesi suretiyle deneysel bir çalışma hazırlanması amaçlanmıştır.

## **1.2 Çalışmanın Önemi**

Ülkemizde horasan harç ve sıvaları üzerine yapılan çalışmalar sınırlı sayıda olmasına rağmen, 1980'lerden itibaren orijinal tarihi harçların özelliklerini belirlemeye yönelik olarak deneysel çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar, horasan harç ve sıvaların fiziksel özellikleri, hidrolik özellikleri, hammadde kompozisyonları ve karışımda agrega olarak kullanılan tuğlaların özellikleri üzerine detaylı bilgiler vermektedir (Uğurlu & Böke, 2006). Bu noktada çalışmanın bir diğer yönü de, orijinal harçlar üzerine yapılan çalışmalarda elde edilen verileri referans alıp, laboratuvar koşullarında farklı parametreleri çalışmaya katarak deney numuneleri üretmek ve tarihi belge niteliğindeki yapılar için koruma harçlarının geliştirilmesini sağlamak olmalıdır.

Bu çalışmada, horasan harcının ana hammaddeleriyle ve ince öğütülmüş puzolanik katkı maddeleri eklenmesiyle üretilen harçların, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve bu özelliklerin orijinal tarihi harçlardan elde edilen veriler ile uyumluluğu değerlendirilmektedir. Laboratuvarında farklı hammadde kompozisyonları ile harç üretiminin, bileşen özelliklerinin incelenmesi bakımından avantaj sağlamasının yanında, numunelerin istenilen sayıda üretilip, farklı ortamlarda bırakılması, elde edilen verileri arttırması bakımından önemlidir. Aynı zamanda

hammadde kompozisyonları ve karışım oranları bilinerek hazırlanan harç numunelerinin, yapılan deneyler sonrasında tespit edilen yapısal özelliklerinin sonuçları, uygulanan deneysel metodolojinin de test edilmesi açısından önem taşımaktadır.

### **1.3 Çalışmanın Yöntemi**

Bu çalışmanın metodu genel olarak, literatür bölümünü, deneysel çalışmaları ve deneysel çalışma sonuçlarını içeren bir altyapıya oturmaktadır.

Bu kapsamda, bölüm birde, konuya giriş yapılarak, çalışmanın amacı, önemi ve yönteminden bahsedilmiştir. Harçların karakterizasyonunda, harcı oluşturan malzemelerin özellikleri, karışım oranları ve kullanım alanları gibi pek çok faktör etkili olmaktadır. Bu nedenle bölüm ikide, konuyla ilgili literatür taraması yapılarak harçların özellikleri, yapıdaki kullanımları, harcı meydana getiren malzemelerin özellikleri ve hammaddelerine göre tarihi yapı harçları incelenmektedir. Bölüm üçte, analizi yapılacak horasan harçlarının tarihi ve teknik özellikleri hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Bölüm dördte, uygulanacak deney şeması, kullanılacak malzemelerin tanımlanması ve yapılacak ön deneyler anlatılmakta, ardından yapılacak deneysel çalışmalar için standartlardan ve diğer kaynaklardan ayrıntılı bilgiler aktarılmaktadır. Bölüm beşte, hazırlanan horasan harçları numuneleri üzerinde, morfolojik özelliklerin tespiti için deneyler yapılmakta, deney sonuçları grafik ve tablolar ile gösterilmekte ve açıklanmaktadır. Sonuç bölümünde ise, elde edilen bulgulara dair genel bir değerlendirme yapılmaktadır.



## 2. HARÇLAR

### 2.1 Harçların Özellikleri ve Yapılardaki Kullanımı

Bağlayıcı malzeme, dolgu malzemesi ve suyun belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen, plastik kıvamdaki, sertleşebilme özelliğine sahip hamurlara “harç” denilmektedir. (Akman, 1987).

Harç ve sıvalar çoğunlukla üretimleri için kullanılacak bağlayıcı malzemelere göre isimlendirilmektedirler (Örneğin; kireç harç ve sıvaları, çimento harç ve sıvaları, alçı harç ve sıvaları, gliserinli harç vb.). Harcın özellikleri ve karakteristiği de bağlayıcı malzemenin karakterine bağlıdır (Palomo ve diğ.).

Zaman içerisinde harcın bazı özelliklerini geliştirmek ve değiştirmek amacıyla, harç karışımları içerisinde (ana bileşenlerin yanı sıra) farklı ürünler ve katkı maddeleri ilave edilmiştir. İlave edilen bu ürünler döneme ve harcın kullanım alanına göre değişmiştir. Başlarda, kan, yumurta ve incir sütü gibi doğal maddeler eklenirken, endüstriyelleşme sonrası, uçucu kül ve fırın cürufu gibi katkı maddeleri veya organik polimer, akrilik reçine ve epoksi reçinesi gibi daha karmaşık maddeler kullanılmaktadır (Palomo ve diğ.).

Harcın yapıda kullanımının temel amacı, yapı bileşenlerini meydana getiren elemanların birbiriyle bağlantısını sağlayarak, bir yapı bütünü oluşturmak ve bu bileşenlere gelen basınç yükünü dağıtmaktır. Ayrıca, yapı elemanlarını atmosferin tahrip edici etkilerine karşı korumak içinde harç uygulaması yapılmaktadır (Satongar, 1994; Palomo ve diğ.).

Genel olarak harçlar, yapıda kullanım yerine göre üç farklı şekilde adlandırılmaktadır. Duvarı oluşturan elemanların birbirine bağlanması ve duvarın yatay ve düşey boşluklarının doldurulması amacıyla kullanılan harçlara “duvar harçları” denilmektedir. Duvarı meydana getiren elemanların birlikte çalışmasını sağlayan, duvarın yatay ve düşey kuvvetlere karşı direncini arttıran harçlar ise “sıva harçları” olarak adlandırılmaktadır. Duvarın sıvalı olması, yarattığı sargılama etkisiyle kendini bırakmasını engellemekte ve duvarın rijitlik kazanmasını

sağlamaktadır. Suyula ilişkili alanlarda, suyun sızmasını engellemek için yüksek dozajda çimento karıştırarak elde edilen harçlara ise “şap” denilmektedir (Şimşek, 2007).

RILEM’de harçların yapılarıdaki kullanımı ve harç içerisindeki bağlayıcının cinsine göre iki tip sınıflandırma yapmaktadır (Palomo ve diğ.).

Birinci sınıflandırmaya göre:

- Sıva olarak kullanılan harçlar,
- Kaplama uygulamalarında kullanılan harçlar (kaldırımlar, zeminler, duvarlar, diğer mimari elemanlar, vb),
- Dekorasyon uygulamalarında kullanılan harçlar (rölyefler, vb),
- Duvar harcı.

İkinci sınıflandırmaya göre:

- Kireç harçları,
- Kireç ve puzolanik maddelerden oluşan harçlar,
- Hidrolik bağlayıcılardan oluşan harçlar,
- Alçı harçları,
- Killi bağlayıcılardan oluşan harçlar,
- Organik bağlayıcılardan oluşan harçlar,
- Birden fazla bağlayıcıdan oluşan harçlar.

Harç yapımı sırasında dikkat edilmesi gereken özellikler şu şekilde sıralanabilir (Şimşek, 2007):

- Harcın kullanılacağı yere göre bağlayıcı cinsi (çimento, kireç, alçı) seçilmelidir.
- Bağlayıcı malzeme miktarı iyi ayarlanmalıdır. Bağlayıcı malzeme az olursa harcın dayanımı az olmaktadır. Miktar fazla olduğu takdirde ekonomik açıdan uygun olmamasının yanında işlenebilirliği zorlaşmakta ve yüzeyde çatlaklar oluşmaktadır.
- Dolgu maddesi olarak kullanılacak kum ve benzeri malzemeler, temiz ve dayanıklı olmalı, cinsi ve menşei belli olmalıdır.



- Harç karışımına ilave edilecek su, içerisinde tuz, şeker, yağ, asit ve benzeri maddeler ihtiva etmemeli, içilebilir nitelikte olmalıdır. Gereğinden fazla su kullanımı da hazırlanacak harcın mukavemetini etkileyeceği için su oranına dikkat edilmelidir.

## 2.2 Harç ve Sıva Malzemeleri

Kompozit bir malzeme olan harç; bağlayıcı, doğal ve yapay puzolan, dolgu malzemesi olarak agrega, organik veya inorganik katkı maddelerinden oluşmaktadır. Bu nedenle bir sonraki bölümde harç ve sıva hazırlamada kullanılan malzemelerin tarihi ve teknik özelliklerinden bahsedilmektedir.

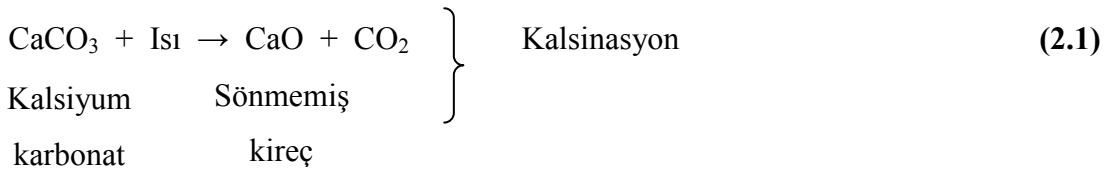
### 2.2.1 Bağlayıcılar

#### 2.2.1.1 Kireç

Kalker taşının uygun sıcaklıklarda kireç ocaklarında yakılması ve içerisindeki karbondioksitin uçurulması işlemi ile elde edilen, kolay ufalanabilir parçalara kireç denilmektedir (Şimşek, 2007).

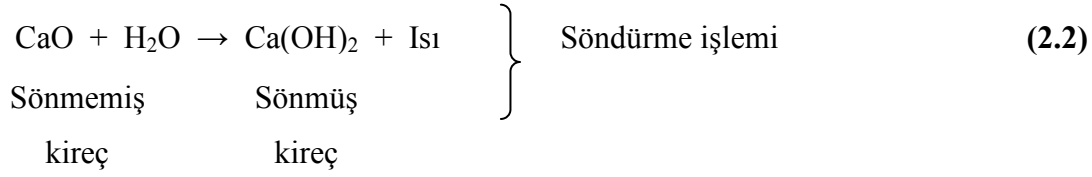
Kireç, Latince’de “calx”, İngilizcede “lime” olarak adlandırılmaktadır. Kirecin harçlarda kullanılmaya başlandığı dönem tam olarak bilinmese de, eski Yunan, Roma ve onu izleyen dönemlerden günümüze kadar olan sürede kullanıldığı bilinmektedir (Böke ve diğ., 2006).

Kirecin hammaddesi olan kireçtaşları kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) minerallerinden oluşmaktadır. Bu taşların ısı ile kalsine olup karbondioksit gazının ( $\text{CO}_2$ ) yapıdan ayrılması sonucu sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) elde edilmektedir (2.1). Kalsiyum karbonatın kalsinasyon sıcaklığı %100  $\text{CO}_2$  içeren ortamda ve 760 mm Hg basınçta  $900^\circ\text{C}$ ’tır ve ortamdaki  $\text{CO}_2$  derişimi azaldıkça kalsinasyon sıcaklığı azalmaktadır (Boynton, 1980).



Sönmemiş kirecin su veya havada bulunan nem ile reaksiyona girmesi sonucunda ise harçlarda kullandığımız sönmüş kireç yani kalsiyum hidroksit oluşmaktadır (2.2).

Kirecin sönmesi için havada %15 oranında nisbi nem olması yeterlidir (Boynton, 1980).

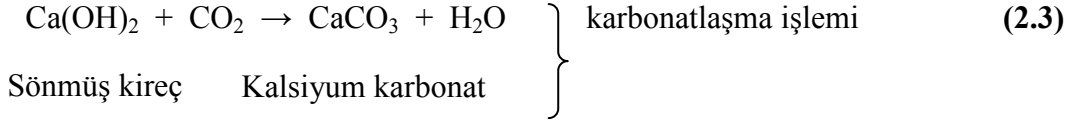


Roma döneminde kireç taşının kalsinasyon işlemi, taş ve tuğladan yapılan ocaklarda, yakıt olarak odunun kullanılması ile gerçekleşmiştir. Bu üretim yönteminde kullanılacak odunun miktarı, yerleşimi, fırın sıcaklığı, kirecin bekletilme süresi ve taşınmaları gibi faktörler kirecin kalitesini etkilemektedir. Bu nedenle, harç yapımında kullanılacak kirecin kalsine edilme yöntemi, iyi kalite kireç elde etmek için önem taşımaktadır (Krumnacher, 2001).

Kirecin kalitesini ve reaktifliğini etkileyen diğer faktörlerde kireç taşlarının cinsi, saflığı, yumru büyüklüğü, gözenekliliği ve gözeneklilik dağılımı gibi fiziksel özelliklerin yanı sıra kalsiyum karbonat kristallerinin büyüklüğüdür (McClellan & Eades, 1970). Söndürme işleminde kullanılacak suyun saflığı, su/kireç oranı ve karıştırma işlemi de kirecin özelliklerini etkilemektedir (Böke ve diğ., 2004).

Gözenekli, saf ve çok yüksek sıcaklıklarda kalsine edilmemiş kireç taşından elde edilen sönmemiş kireç suyla daha hızlı reaksiyona girmektedir. Sönmemiş kirecin öğütülerek kullanılması da söndürme işlemini hızlandırmaktadır. Söndürme işleminde kullanılacak suyun saflığı kirecin söndürülme işleminde etkilidir. Suyun sülfat ve sülfid iyonları içermesi kirecin söndürme işlemini geciktirmekte, klorür iyonları da söndürme işlemini hızlandırmasına rağmen, tuzlanmaya neden olmaktadır. Ayrıca söndürme sırasındaki karıştırma işlemi söndürme hızını arttırmaktadır. Söndürme suyunun sıcaklığı da söndürme işlemini hızlandırmasına rağmen yüksek sıcaklık kirecin topaklaşmasına neden olarak plastik özelliğini yitirmesine neden olmaktadır (Boynton, 1980).

Sönmüş kirecin karbonatlaşması işlemi, havanın karbondioksitinin yavaşça absorbe edilmesi sonucu, kalsiyum hidroksitinin ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) kalsiyum karbonata dönüşmesi sonucunda gerçekleşmektedir (2.3).



Kirecin karbonatlaşması işleminde, suyun miktarı, karbondioksit gazının derişimi ve kirecin geçirgenliği önem taşımaktadır (Uğurlu, 2005). Karbonatlaşma süreci kirecin dış yüzeyinde başlamakta ve iç kısımlara doğru devam etmektedir, ancak suyun azlığında veya fazlalığında bu süreç yavaşlamaktadır (Swenson & Sereda, 1968). Ayrıca ortamda karbondioksit derişimi arttıkça karbonatlaşma artmaktadır.

Kireçler özelliklerine göre hidrolik kireçler ve hidrolik olmayan kireçler (saf kireçler) olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Her ikisinin de sertleşme süreci birbirinden farklı gelişmektedir. Hidrolik kireçler içeriğinde yüksek oranlarda kil partikülleri ihtiva eden kireç taşlarından oluşmakta ve sertleşme bu killer, kireç ve su arasındaki reaksiyonlarla gerçekleşmektedir. Diğer yandan hidrolik olmayan kireçlerde karbonatlaşma, kirecin bünyesindeki CaO ile atmosferdeki CO<sub>2</sub> arasındaki reaksiyon sonucunda oluşmaktadır (Pavia & Treacy, 2006).

Hidrolik olmayan kireçler, yüksek geçirgenlik ve esneklik özelliğine sahip olmanın yanı sıra plastik özelliğe sahiptirler. Ancak karbonatlaşmanın ilk dönemlerinde mekanik dayanımları az ve suda çözünebilirlikleri fazladır. Hidrolik kireçler ise suyla sertleşme reaksiyonlarından ötürü daha fazla mekanik dayanım göstermektedirler. Saf kireçler ile karşılaştırıldığında daha düşük geçirgenlik özellikleri sayesinde, neme ve tuzlanmaya karşı daha fazla direnç göstermektedirler. Bu nedenle eski dönemlerden günümüze kadar olan sürede hidrolik kireç ile hazırlanan harçlar daha çok suyla ilişkili yapılarda kullanılmıştır (Pavia & Treacy, 2006).

Hidrolik olmayan kireçler içerdiği minerallerin oranına göre kalsiyumca zengin veya zayıf olabilmektedir. İçeriğinde % 5 den az silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) ve alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ihtiva eden kireçler yüksek kalsiyum oranında kireçlerdir. İçeriğindeki silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) ve alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oranı %5 den fazla olan kireçler ise zayıf kireçler sınıfına girmektedir. Kirecin % 5 den daha fazla magnezyum oksit içermesi halinde ise magnezyum kireci olarak adlandırılmaktadırlar (Edvin & Eckel, 1928).

Uğurlu ve Böke tarafından Roma ve Osmanlı dönemi horasan harçları üzerinde yapılan araştırmada, SEM-EDS analizlerinde karbonatlaşmış kireç topraklarının %94 oranında kalsiyum karbonat, %4 oranında silisyum oksit ve %2 oranında alüminyum

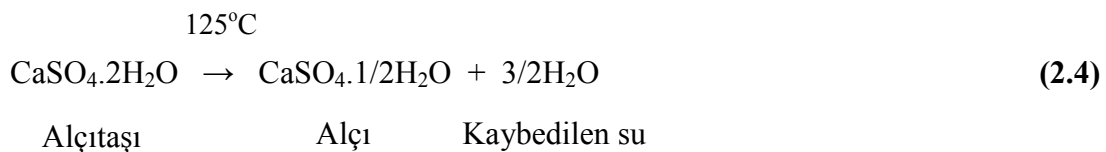
oksit içerdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar Roma ve Osmanlı dönemi horasan harçlarının hazırlanmasında kalsiyumca zengin saf kirecin kullanıldığını göstermektedir (Uğurlu & Böke, 2010).

Aynı harçlar üzerinde yapılan SEM analizlerinde ise kalsit kristallerinin boyutunun 10 µm den küçük olduğu görülmüştür. Kirecin bekletilme süresi uzadıkça kalsit kristallerinin boyutları küçülmekte ve havanın karbondioksiti ile reaksiyona girecek yüzeyin artmasıyla kireç daha çabuk karbonatlaşmaktadır (Rodriquez ve diğ, 1998). Bu da, Roma ve onu izleyen dönemlerde kullanılan saf kirecin aynı zamanda bekletildikten sonra kullanıldığını göstermektedir (Uğurlu & Böke, 2010). Ayrıca kirecin bekletilme süresi uzadıkça plastik özelliği ve su tutma kapasitesi de artmaktadır (Böke ve diğ, 2004).

### 2.2.1.2 Alçı

Doğada alçı taşının selenit ve anhidrit olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Doğal alçıtaşı olan selenit ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) saydam camsı yapıda veya sıkı mikrokristal yapıda olabilmektedir ve yoğunluğu  $2.3\text{gr/cm}^3$ 'tür. Anhidrit (susuz  $\text{CaSO}_4$ ) ise sıkı veya kristal yapıdadır ve yoğunluğu  $2.8-3.0\text{ gr/cm}^3$  arasındadır (Güleç, 1992). Alçıtaşı içerisinde genellikle %10-12 kireçtaşı ( $\text{CaCO}_3$ ), kil, demir oksit, kum ve  $\text{SiO}_2$  bulunmaktadır. Saf hali beyaz renklidir ancak içerdiği bileşenlere göre gri, kahverengi veya kırmızımsı kahverengi olabilmektedir (Satongar, 1994).

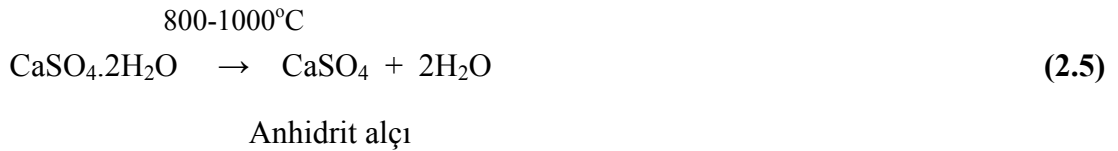
Harç olarak kullandığımız alçı, alçıtaşının küçük boyutlarda kırılarak  $120-190^\circ\text{C}$  arası bir sıcaklıkta kısmi bir dehidrasyona uğratılmasıyla elde edilmektedir (Şimşek, 2007). Yer yüzeyine yakın yerlerden veya taş ocaklarından çıkarılan alçıtaşı, değirmen yardımıyla 50-75 mm boyutlarına gelecek şekilde küçültülür. Daha sonra, makinelerde tokmaklanıp 13 mm boyutlarına getirilen küçük parçalar halindeki alçıtaşları döner çarklarda ısıtılır. Isıtma işlemi sonrasında alçıtaşı içerdiği kristal suyun 1,5 molekülünü (%75'ini) kaybetmekte ve alçı olarak adlandırdığımız beyaz toz renkli malzemeye dönüşmektedir (2.4) (Satongar, 1994).



Yarı hidrat hale gelen alçıya su katılırsa üretim reaksiyonunun tam tersi bir reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyonun kimyasal nedeni hidrasyon, fiziksel nedeni kristalleşmedir. Alçının eski haline dönüşmesi 10-15 dk sürede olmaktadır. Hidrasyonun bu kadar kısa sürede olması, alçının mukavemetini düşürdüğü için pratik açıdan sakıncalıdır. Bu nedenle sertleşme hızı; zayıf asitler (limon asidi, sirke), zambak, nişasta, 60°C'nin üstündeki sıcaklıkta boraks, şeker, jelatin, tutkal, kazein ve talk gibi katkıları konularak veya su ilavesi ile azaltılabilmektedir (Şimşek, 2007; Satongar, 1994; Güleç, 1992).

Düşük sıcaklıklarda elde edilen alçıların sertleşmesiyle oluşan alçıtaşlarının içi boşlukludur ve suya karşı dayanıklı değildir. Bu nedene dış atmosfer etkisinde dayanım göstermezler. Ancak yapıda; iç sıvada, içine lifli malzemeler eklenerek kartonpiyer işlerinde ve bölme panolarda kullanılabilirler (Şimşek, 2007).

Alçıtaşı fırında 800-1000°C arasında bir sıcaklıkta pişirilirse bünyesindeki iki molekül suyu tamamen kaybeder (2.5). Elde edilen bu alçıya anhidrit alçı (susuz alçı) denilmektedir. Bu alçı türünün aşınma ve basınç dayanımı oldukça yüksek olduğu için, dış etkilere karşı dayanıklıdır. Yer döşemesinde, yapı elemanlarının üretiminde tek başlarına kullanıldığı gibi, bir başka bağlayıcı (çimento ve kireç) ile beraber kullanılabılırler. Sertleşme hızı yavaştır ve tamamen prizini alması 6-20 saat arasında gerçekleşmektedir (Şimşek, 2007).



### 2.2.1.3 Çimento-portland çimentosu

Çimentolar su ile karıştırılıp hamur haline getirildikten sonra havada veya su içerisinde sertleşebilen hidrolik bağlayıcı maddelerdir (Şimşek, 2007).

İlk kez, 1824 yılında Joseph Aspdin adlı bir İngiliz inşaatçı günümüzde kullandığımız çimentonun üretimine ilişkin çalışmalar yapmış, kalker ve kilin kalsinasyonu sonucunda elde edilen çimentoyu bulmuştur. Çimento sertleşirken Portland adasında ki bir taşın şeklini alması nedeniyle, "portland çimentosu" olarak adlandırılmıştır. 1838'lerde Isaac Johnson, kalsinasyon sıcaklığını yükselterek ve pişirilme sonrası öğütmeye önem vererek sertleşme süresinin uzamasını ve daha iyi

özelliklerde çimento elde edilmesini sağlamıştır. Günümüz çimento üretimine en yakın yöntemler 1850'lerin sonunda uygulanmıştır (Satongar, 1994).

Çimentonun hammaddeleri kalker ve kildir. Bu ana maddelerin belirli oranlarda birbiriyle karıştırılarak, 1300-1500°C'lerde pişirilmesi ve öğütülmesi sonucunda klinker elde edilir. Yüksek sıcaklıklarda pişirilme esnasında, kalkerin ayrışması sonucu kireç (CaO), kilin ayrışması sonucu ise kil minerallerine bağlı olarak silis (SiO<sub>2</sub>), Alümin (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve Demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ortaya çıkmakta, bu ürünler birbirleriyle reaksiyona girerek Portland çimentosunun ana bileşenlerini oluşturmaktadırlar (Şimşek, 2007).

Klinker gri renkte 15-30 mm boyutlarında ufak tanelerden oluşmaktadır. Klinkere minör katkı maddelerinin (FeO<sub>2</sub>, alçı vb) ilave edilerek, değirmenlerde çok daha ince hale gelecek şekilde öğütülmesi sonucu, toz halinde ve su ile sertleşen bağlayıcı temel yapı malzemesi olan çimento oluşmaktadır. Klinkerin öğütülme aşamasından önce ağırlığının %3-6 oranlarında ilave edilen alçıtaşı priz süresinin ayarlanmasını sağlamaktadır.

Toz halindeki çimentoya su ilave edilmesi ile sönmüş kireç ve jel halindeki kalsiyum silikat ve alüminatlar oluşmaktadır. Sönmüş kireçten ötürü ortam bazik özelliktedir. Sertleşme reaksiyonu sırasında ise oluşan jel kabuklaşmaya başlar ve su bu kabuktan içeri girerek çimento moleküllerinin birbirine ağ gibi bağlanıp katılaşmasına neden olur (Satongar, 1994).

Portland çimentosu, kullanım alanlarının özelliğine göre içerisine katılan bileşenlerin değişmesi suretiyle farklı isimler almaktadır. TS EN 197-1'e göre; CEM I (portland çimentosu), CEM II (portland kompoze), CEM III (yüksek fırın cürufu çimentosu), CEM IV (puzolanlı çimento) ve CEM V (kompoze çimento) olarak beş ana sınıfa ayrılmaktadır (Şimşek, 2007).

#### **2.2.1.4 Puzolanlar**

Puzolanlar, kendi başına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az olan, fakat kireç ile reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan amorf silikatlar ve alüminatlardan oluşan agregalardır. Bu özellikleri ile oluşturdukları harç ve sıvaların nemli ortamlarda, hatta su içerisindeki yapılarda sertleşmesini sağlamaktadırlar (Böke ve diğ, 2004; Erdoğan & Erdoğan, 2007).

Puzolanik maddeler, doğal puzolanlar ve yapay puzolanlar olarak iki gruba ayrılmaktadır (Erdoğan & Erdoğan, 2007).

Silissi veya alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan volkanik ve sedimanter kayalara “doğal puzolanlar” denilmektedir (TS 25, 2008). Volkanik kül, tuf, tras, opal ve diatomlu toprak gibi malzemeler doğal puzolanlardır. Kiremit, tuğla ve benzeri pişmiş malzemeler, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, silis dumani ve pirinç kabuğu külü ise yapay puzolanlar sınıfına girmektedir (Erdoğan & Erdoğan, 2007; Şimşek, 2007).

Binlerce yıldan beri kireç harcına doğal puzolanlar eklenerek hidrolik harç elde edildiği bilinmektedir (Erdoğan & Erdoğan, 2007). Konya-Çatalhöyük’te, Neolitik çağa ait 8000 yıllık olduğu belirlenen harçlar bulunmuştur. Bunların Erciyes, Hasan dağı gibi dağlardan elde edilen volkanik kül içeren topraklardan yapılmış olma ihtimali üzerinde durulmaktadır. Girit ve Rodos’ta da üç bin dört bin yıl önce yapılmış su yapıları ve mozaik işlerinde puzolan ve söndürülmüş kireçten oluşan bağlayıcılar kullanıldığı bilinmektedir ve bu yapılar hala dayanıklılığını korumaktadır (Erdoğan & Erdoğan, 2007).

Milattan sonra ikinci yüzyılda ise, doğal puzolanlar, özellikle volkanik kaynaklı olanlar, karışımlarda ince toz halinde veya iri agregalar olarak sıklıkla kullanılmış ve hidrolik özelliklerinden dolayı suyla ilişkili yapılarda bilinçli bir şekilde tercih edilmiştir (Moropoulou ve diğ., 2005). Romalı ünlü mimar Vitruvius M.Ö. 20-30 yılları arasında tamamladığı “Mimarlık Üzerine On Kitap” adlı eserinde, puzolanın hidrolik özelliğinin Romalılar tarafından keşfedilmesinden ve puzolanik malzemelerin “pozzolana” (puzolan) olarak anılmaya başlanmasından bahsetmektedir (Vitruvius, 1990). Romalılar volkanik külü, sönmüş kireç ve suyu karıştırarak su altında sertleşen bağlayıcı hamuru elde etmişler, bu bağlayıcının içerisine taş parçaları gömerek Roma betonunu üretmişlerdir (Erdoğan & Erdoğan, 2007).

Doğal puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılık özelliği kazanıp sertleşemezler. Bu reaksiyonun oluşabilmesi için puzolanın ince öğütülerek, suyun varlığında ve normal çevre sıcaklığında, kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ile belirli oranlarda karıştırılması gerekmektedir. Reaksiyon sonucunda harca dayanım kazandıran kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikler oluşmaktadır. Bu bileşikler, hidrolik bağlayıcıların

sertleşmesinde oluşan bileşiklerle benzerdir. Doğal puzolanların kimyasal bileşimi büyük oranda, reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )'ten oluşmaktadır. Geri kalan kısım demir (III) oksit ve diğer oksitlerdir. Reaktif silisyum dioksit miktarı %25'den az olmamalıdır (TS 25, 2008).

Tuğla ve kiremit kırıkları gibi yapay puzolanlar ise, doğal puzolanın bulunmadığı durumlarda hidrolik harç oluşturmak için kullanılmıştır (Moropoulou ve diğ, 2005). Roma ve Bizans dönemi harçları birbirine yakın oranlarda kireç, agrega ve doğal puzolan kullanılarak hazırlanmasına rağmen, Bizans harçlarında doğal puzolana ek olarak tuğla kırıkları da görülmektedir. Bizans harçlarını, Roma harçlarından ayıran unsur tuğla kırığı kullanımındadır (Özkaya ve diğ, 2006). Ülkemizde de tuğla ve kiremit tozlarının kireç ile karıştırılması sonucu üretilen horasan harcı eski eserlerin yapımında sıklıkla kullanılmıştır (Satongar, 1994).

Yapılan incelemelerde, Roma ve Osmanlı Dönemi'nde kullanılan tuğla agregaların yüksek oranda  $\text{SiO}_2$  (Silisyum dioksit),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Alüminyum oksit) ve daha düşük oranda  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{CaO}$ 'den oluştuğu belirlenmiştir (Uğurlu & Böke, 2010). Tuğlanın yapısında bulunan kil, kuvars ve feldspat mineralleri de pişirilme derecelerine göre tuğlaya puzolanik yapı kazandırmaktadırlar. Bu bileşenlerden oluşan karışım  $600-900^\circ\text{C}$ 'lerde ısıtılırsa, bu sıcaklıkta tuğlanın hammaddesi olan killer amorf hale dönüşmekte ve tuğla puzolanik özellik kazanmaktadır. Eğer kalsinasyon sıcaklığı  $900^\circ\text{C}$ 'nin üzerine çıkarsa mullit, kristobalit vb. gibi kararlı mineraller oluşmakta ve puzolanik özellik yok olmaktadır (He ve diğ, 1995; Baronia ve diğ, 1997).

Horasan harcı ve sıvası hazırlamada, kullanılacak tuğlaların puzolanik özelliğe sahip olması gerekmektedir. Bu tuğlaların iyi pişirilmesi gerekliliği Osmanlı Dönemi şartnamelerinde belirtilmiştir (Akman ve diğ, 1986). Yapılan analizlerde de Roma ve Osmanlı Dönemi horasan harçlarında kullanılan tuğla agregaların mullit, kristobalit gibi yüksek sıcaklıkta oluşan mineraller içermediği gözlenmiş, buradan her iki dönemde de tuğlanın pişirilme sıcaklığının  $900^\circ\text{C}$ 'yi aşmadığı sonucu çıkarılmıştır (Uğurlu & Böke, 2010).

Puzolanik malzemenin yeterli bağlayıcılığı sağlayabilmesi için sahip olması gereken özellikler şu şekilde belirtilmiştir (Erdoğan & Erdoğan, 2007):



- Puzolanın içerdiği silika ve alümina miktarı yüksek olmalıdır. Beton endüstrisinde kullanılacak puzolanın içeriğindeki “SiO<sub>2</sub> (silisyum dioksit) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alüminyum oksit) + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (demir oksit)” miktarının en az %70 olması gerekmektedir.
- Amorf yapıya sahip olması gerekmektedir.
- Doğal haliyle çok ince taneli durumda olmalı veya öğütülerek ince taneli hale getirilmelidir. Harç karışımında ince taneli katkı maddelerinin yer alması, harçtaki serbest suyun bu maddelere bağlanmasını, böylece taze harçtaki terlemenin daha az olmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda ince malzemeler, boşlukların azalmasına ve oluşacak harcın su geçirimsizliğinin azalmasına yol açmaktadır.

### **2.2.2 Dolgu malzemeleri**

Dolgu malzemeleri, doğal veya yapay kaynaklardan elde edilen silikat ve kalsiyum bileşenlerinden oluşan kum, puzolan, tras, kırılmış taş, mermer ve tuğla parçacıkları gibi malzemelerdir. Harç ve sıvalarda, kullanım amacına göre farklı boyutlarda karışıma eklenebilmektedirler.

Kullanılacak dolgu malzemelerinin, bozulmuş taş parçaları, organik madde, kil ve tuz gibi harcın saflığını bozacak maddeler içermemesi gerekmektedir. Dolgu malzemelerinin boyutları ve kaliteleri hazırlanacak harcın veya sıvanın dayanımını büyük ölçüde etkilemektedir (Güleç, 1992).

Kullanılacak agregaların boyutları iyi ayarlandığı takdirde, büyük boyutlu agregaların arasını daha küçük boyutlu agregalar dolduracağı için, kullanılacak bağlayıcının miktarı azalır ve buna bağlı olarak daha sıkı ve dayanıklı bir karışım oluşur. Kuruma esnasında en fazla rötreyi yapan bağlayıcı miktarı azalınca hacim küçülmesine bağlı çatlaklarda en aza indirgenmiş olmaktadır (Güleç, 1992; Satongar, 1994).

Dolgu malzemesi olarak kullanılacak agregaların yoğunlukları ilave edildikleri harç karışımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinde de etkilidir. Tuğla kırıklarının yoğunlukları; kireç taşı, granit, bazalt ve benzeri agregalardan daha düşük olması sebebiyle tuğla kırığından hazırlanan harçlar daha hafiftir ve çekme dayanımları da daha yüksektir (Böke ve diğ, 2004).

Kireç harç ve sıvalarında dolgu malzemesi olarak agregalar kullanılmaktadır. Bu agregalar kireç ile reaksiyona girmeyen (etkisiz) veya reaksiyona giren (puzolanik) agregalar olarak sınıflandırılmaktadırlar. Etkisiz agregalar, dere, taş ocağı veya denizlerden elde edilmektedir. Puzolanik agregalar ise kireç ile reaksiyona girerek su altında da sertleşebilen hidrolik harçları oluşturan agregalardır.

### **2.2.3 Katkı malzemeleri**

Eski harç ve sıvaların hazırlanmasında harca gerekli birtakım fiziksel özellikleri kazandırmak ve karbonatlaşmayı hızlandırmak veya geciktirmek için bazı organik veya inorganik maddeler ilave edilmiştir. İlave edilen bu maddeler, uygulandıkları dönemlere ve yöreye göre farklılaşmıştır. Bunlar; kan, yumurta akı, şeker, tutkal, arap zamkı, kemik tutkalı, incir sütü, peynir, gübre, bitki suları ve kazein gibi malzemelerdir (Moropoulou ve diğ, 2005; Güleç, 1992; Böke ve diğ, 2004).

Bu malzemelerden, arap zamkı, incir sütü ve tutkal, yapışkan olarak kullanılmıştır. Çavdar hamuru, domuz yağı, kesik süt kirecin daha çabuk sertleşmesini sağlarken, yumurta akı ve kan sertleşmeyi geciktirmektedir. Şeker suyun donma erime fazlarında meydana getirdiği bozulmaları yavaşlatmaktadır. Balmumu harçtaki büzülme önlemektedir. Yumurta akı, hayvan tutkalı, şeker, süt, mineral ve keten tohumu gibi katkı maddeleri de kirecin plastik özelliğini artırarak kırılmasını azaltmaktadır (Böke ve diğ, 2004).

### **2.3 Hammaddelerine Göre Tarihi Yapı Harçları**

Tarihi kaynaklar, eski dönem harçlarının, izolasyon kaplaması olarak sarnıçlarda, su kuyularında, su kemerlerinde ve kanalizasyonlarda, destekleyici malzemeler olarak, kaldırımlarda, mozaiklerde, freskolarda, sıva olarak, iç ve dış duvarlarda ve de bağlantı harcı olarak kullanıldığını belirtmektedir. Helenistik, Bizans ve Osmanlı döneminden günümüze kadar olan tarihsel periyotta, farklı ihtiyaçlar neticesinde üretimi ve kullanımı değişen harç örnekleriyle yapılan sayısız mimari ve strüktürel yapı örneği bulunmaktadır (Moropoulou ve diğ, 2000a).

Tarihi harçlar kompozit materyallerdir. Hidrolik veya havanın karbon dioksiti ile reaksiyona giren bağlayıcı malzemelerden, agregalardan ve pasif veya aktif katkı maddelerinden oluşmaktadırlar (Moropoulou ve diğ, 2000a). İçerisine katılan

bileşenlere göre özellikleri değişen çamur, alçı ve kireç harçları da tarih boyunca pek çok yapıda temel yapı bileşeni olarak kullanılmıştır.

Tarihi harçların sistematik olarak çalışılmaya başlanması nispeten yeni bir durumdur. 1981 yılında yürütülen ilk deneysel çalışmalar ile (ICCROM tarafından desteklenen) tarihi harçların ve bunlarla uyumlu çalışabilecek tamir harçlarının araştırılması amaçlanmıştır (Palomo ve diğ.).

### **2.3.1 Çamur ve alçı harçları**

Çamur, antik yapılarda doğal taş, kerpiç ve tuğla duvarlar için kullanılan harçların ilk bağlayıcı malzemesi olmuştur ve günümüzde hala dünyanın birçok yerinde kullanılmaktadır. Çamur harçları, kil, kum, silt ve lifli malzemelerin karıştırılmasıyla oluşmaktadır ve bu harçlar Antik Mısır'da yine kerpiç tuğlaları bağlamak için kullanılmıştır (Moropoulou ve diğ., 2005; Uğurlu, 2005). Aynı zamanda, termal yalıtım sağlaması yönüyle, zor iklim şartları için ideal yapı malzemesi olarak görülmüştür. Ülkemizde de Çatalhöyük, Hacılar, Beycesultan (M.Ö. 5400-4000), Troy (M.Ö. 2300-1200), Alishar ve Boğazköy (1900-1200) gibi eski yerleşim yerlerinde çamur harcının bağlayıcı olarak kullanıldığı bilinmektedir (Uğurlu, 2005). M.Ö. 3000'lerde asfalt da bağlayıcı olarak kullanılmaya başlanmış ve uzun bir süre kullanımı devam etmiştir. Geç dönem Babil'inde Nebukadnezar döneminde yapıların kerpiç ve asfalttan yapıldığı, daha sonraları sönmüş kireç, kil, asfalt, kül ve diğer lifli materyallerden oluşan karışımların kullanıldığı bilinmektedir (Moropoulou ve diğ., 2005).

Antik dönemlerde bağlayıcı elde etmekte en büyük zorluk yüksek sıcaklıklar elde edebilmek olmuştur. Alçıtaşından alçı elde etmek için gerekli sıcaklık çok yüksek değerlerde olmayıp 190°C olduğu için alçı harcı da sıklıkla kullanılmıştır. Eski Mısır'ın Sakkara ve Keops piramitlerinde oyulmuş taş blokların arasında dolgu maddesi gibi alçı harcı kullanılmış, aynı zamanda taş blokları düzgün yerleştirebilmek için bir yağlama malzemesi olarak da kullanılmıştır. Çatalhöyük'te de süsleme malzemesi ve duvar kaplaması olarak alçı kullanılmıştır (Moropoulou ve diğ., 2005; Akman, 2003). Alçıtaşı 600°C'nin üzerinde ısıtılırsa anhidrit alçı denilen bağlayıcılık özelliği yüksek, dış etkenlere dayanıklı bir malzeme oluşmaktadır. Mısır firavunu Amenhotep II'nin günümüzden 3400 yıl kadar önce inşa ettirdiği Karnak

tapınaklarında ve aynı dönemlerde Girit'te inşa edilen Knossos Sarayı'nda anhidrit alçı harcı kullanılmıştır (Akman, 2003).

### 2.3.2 Kireç harçları

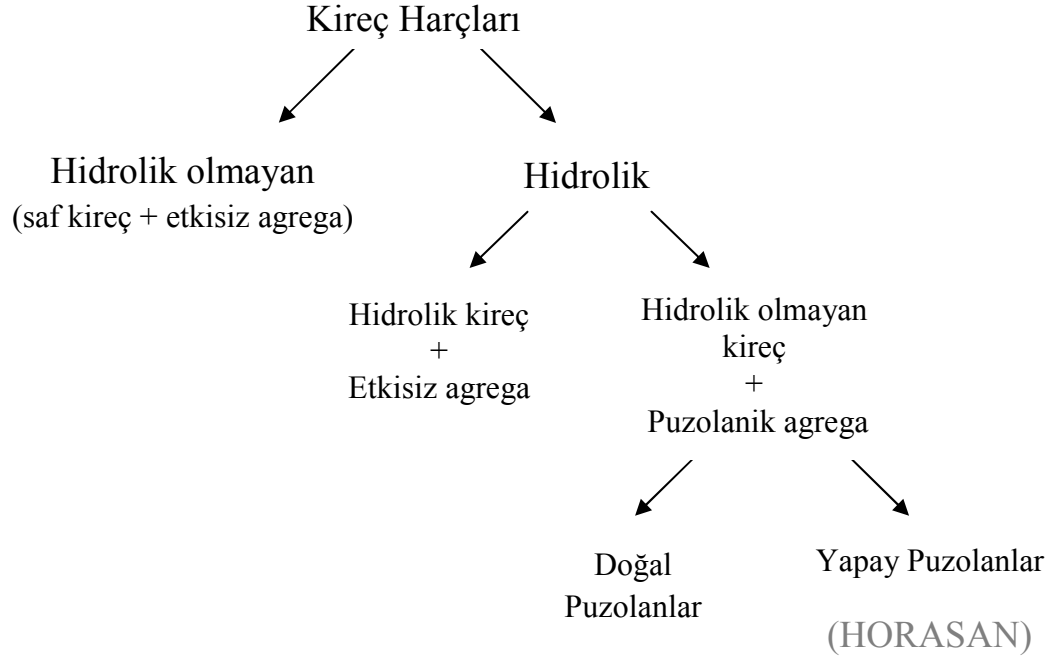
Kireç taşının, antik Mezopotamya'da M.Ö. 2450'den beri kalsine edilerek kullanıldığı, bu bölgede bulunan ve kireç üretimi için kullanılan pişirilme fırınlarının varlığından bilinmektedir (Moropoulou ve diğ, 2005). Bağlayıcı olarak kireç ve dolgu malzemesi olarak agreganın karıştırılmasıyla elde edilen kireç harcı ise Eski Yunan, Roma ve onu izleyen dönemlerde yapı inşasında kullanılmış, ancak çimentonun bulunmasıyla birlikte kullanımları azalmıştır (Böke ve diğ, 2004).

Günümüzde kireç harcı kullanmaya karşı bir eğilim bulunmaktadır ve kireç yapıların korunmasında ve restorasyonunda kullanılan en temel malzemelerden birisi olmuştur. Kireç harçları, harç içerisinde zararlı tuzları oluşturabilecek elementler içermez, bu nedenle suni çimentoya göre tarihi ve geleneksel doku ile daha uyumludur (Pavia & Treacy, 2006).

Kireç harçları Şekil 2.1' deki gibi "hidrolik" ve "hidrolik olmayan" harçlar olarak ikiye ayrılmaktadır (Lea, 1940).

Hidrolik olmayan harçlar, kirecin etkisiz agregalar ile karışmasıyla elde edilmektedirler. Bu tip harçlarda, kireç havanın karbondioksiti ile birleşerek kalkerleşmektedir (Lea, 1940).

Hidrolik harçlar ise, hidrolik kireç ve agrega karışımlarından oluşabileceği gibi, saf kireç ve tuğla, kiremit kırığı gibi puzolanların karıştırılmasıyla da oluşmaktadır. Hidrolik kireç ile oluşan harçlarda sertleşme, kirecin kalsiyum karbonata dönüşmesi ve içinde bulundurduğu kalsiyum alüminat silikatların su ile kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidratları oluşturması sonucu gerçekleşmektedir. Puzolan kullanılan hidrolik harçlarda ise, kirecin puzolan ile reaksiyona girerek kalsiyum alüminat hidrat ve kalsiyum silikat hidratları oluşturması sonucu sertleşme meydana gelmektedir. Oluşan bu ürünlerden dolayı hidrolik harçların mekanik dayanımı, hidrolik olmayan harçlara göre daha yüksektir (Lea, 1940).



Şekil 2.1 : Kireç harçlarının sınıflandırılması.

### 2.3.2.1 Horasan harçları

Horasan; tuğla, kiremit, çömlek gibi pişmiş killi malzemelerin kırılmış öğütülmüş halidir. Horasan harcı ise horasan ve hava kirecinin karıştırılmasıyla elde edilen harca denilmektedir (Akman ve diğ, 1986). Konuyla ilgili daha detaylı bilgi Bölüm 3'de verilmektedir.



### 3. HORASAN HARÇLARININ ÖZELLİKLERİ

#### 3.1 Horasan Harçlarının Tarihçesi ve Kullanım Teknikleri

Horasan; tuğla, kiremit, çömlek gibi pişmiş killi malzemelerin kırılmış öğütülmüş halidir. Horasan harcı ise horasan ve hava kirecinin karıştırılmasıyla elde edilen, puzolanik katkı maddeleri ve kum da ilave edilebilen hidrolik özellikteki harca denilmektedir (Akman ve diğ, 1986; Ersen ve diğ, 1995).

Horasan adı, İran'ın doğusundaki Horasan bölgesinden gelmektedir. Ayrıca, horasan deyimini, Yunanistan'da "korassani", Roma döneminde "cocciopesto", Hindistan'da "surkhi", Arap ülkelerinde "homra" ve Suudi Arabistan'da "horasan" olarak adlandırılmıştır (Akman ve diğ, 1986; Böke ve diğ, 2004).

Hidrate kireç ve tuğla tozundan oluşan harçların kullanımının çok eski tarihlere kadar uzandığı bilinmektedir. Bazı araştırmacılara göre, Fenikeliler tuğla tozunun hava kirecine hidrolik özellik kazandırdığını fark ederek bu harçları ilk kullananlar olmuşlardır. Kral Süleyman ise su toplamak için inşa edeceği sarnıçlarda kireç ve tuğla tozundan oluşan harçları kullanmıştır. Ancak, konuyla ilgili ilk güvenilir kaynaklar, harçlarda tuğla tozlarının ve kırıklarının Roma Dönemi'nden itibaren kullanıldığını belirtmektedir (Baronio ve diğ, 1997). Bu kaynakların en önemlisi; antik dönem mimarı Vitruvius'un kum ve kireçten oluşan harca öğütülmüş veya elenmiş pişmiş toprak ve tuğlanın katılmasıyla özellikleri daha iyi olan bir harçtan bahsettiği eseridir (Baronio ve diğ, 1997; Akman ve diğ, 1986).

Zamanla tuğla tozunun ve kırığının kireç harçlarında kullanımı, Roma İmparatorluğunun her yerine, oradan Kuzey Afrika ve Batı Asya (Türkiye)'ya yayılmıştır. Romalılar tuğla kırığıyla, özellikle de tuğla tozu ile hazırlanmış harcı suya maruz kalan, nemli mekânlarında kullanmışlar, bu hammaddelerin, suya karşı direnci ve harç mukavemetini arttırdığını belirlemişlerdir (Uğurlu & Böke, 2010; Baronio ve diğ, 1997).

Geç Roma ve Bizans dönemlerinde daha iri tuğla kırıkları ve kireç karışımından oluşan harcın kullanımı yaygınlaşmış, karışımdaki agregaların boyutlarının

artmasıyla yapıların mafsallarında da kalınlıklar, 10-15 mm den 60-70 mm ye kadar çıkmıştır. Bizans Dönemi bazı yapılarda, harca pembe rengini veren tuğla tozunun tamamen kaybolduğu, yerine sadece iri tuğla kırıklarının kullanıldığı yapılan çalışmalarda belirlenmiştir (Baronio ve diğ, 1997). Tuğla ve kiremit kırıklarının nohut büyüklüğünde taneler halinde karışıma eklenmiş olduğu bu harçlar, betona eşdeğer bir dayanım gösterdiği için “horasan betonu” olarak da adlandırılmaktadır (Akman ve diğ, 1986).

Roma Dönemi’ni takip eden Selçuklu ve Osmanlı Dönemleri’nde de horasan harç ve sıvaları, hamamlar, su sarnıçları, su yolları, çatı örtüleri ve mozaik altlarında geniş ölçüde kullanılmıştır (Uğurlu & Böke, 2010). Özellikle on beşinci yüzyıl ve sonrasında Osmanlı dönemi köprülerinde, yapı temellerinde ve cami inşaatlarında horasan harcı ve betonuna sıklıkla rastlanmaktadır. Bu malzemenin estetik yönü, dayanımı ve suya karşı direnci bakımından diğer harçlara karşı üstünlüğü Osmanlı İnşaatçıları arasında kabul görmüştür (Akman ve diğ, 1986).

### **3.2 Horasan Harcının Teknik Özellikleri**

Birçok tarihi yapıda kullanılan horasan harcı, bağlayıcı olarak kireç, agrega olarak da tuğla veya kiremit kırıklarının karıştırılmasıyla elde edilmiştir (Böke, ve diğ, 2004).

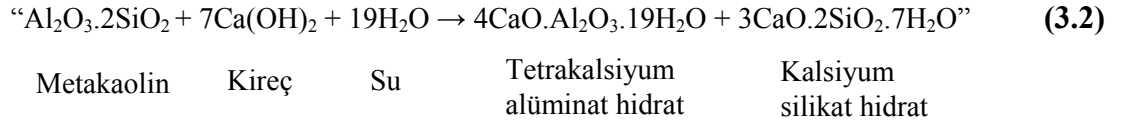
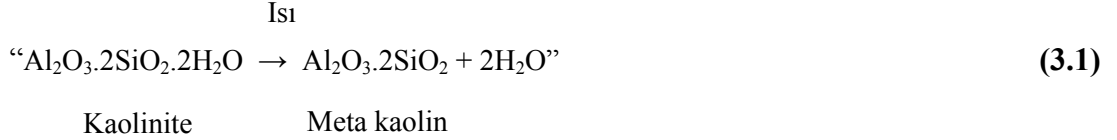
Horasan harçları, kireç ile puzolanik özellikteki tuğla agregaların yapısında bulunan amorf silikat ve alüminatların reaksiyona girmesi ve kirecin havanın karbondioksiti ile karbonatlaşması sonucu sertleşmektedirler. Hidrolik özelliklerinden dolayı bu harçlar su altında da sertleşebilmektedirler (Uğurlu & Böke, 2010).

Tuğla kırığı ve kireç karışımından oluşan horasan harçları asit karbonik sularda bile erimeyen, jel yapılı bir hidrate tuz oluşturmaktadır. Puzolanik etki olarak adlandırılan bu reaksiyon sonucu hidrolik özellikte, dayanımı yüksek harçlar meydana gelmektedir (Akman ve diğ, 1986). Bu harçların karakterizasyonu için tarihi yapı harçları üzerinde pek çok çalışma yapılmıştır ve yapılmaktadır. Elde edilen parametrelere göre de tarihi harçlarla uyumlu tamir harçları üretilebilmektedir.

Tuğlanın yapısında bulunan kil, kuvars ve feldspat mineralleri pişirilme derecelerine göre tuğlaya puzolanik yapı kazandırmaktadırlar. 600-900°C arasında killer puzolanik amorf yapıya dönüşürken, 900°C’nin üzerinde mullit, kristobalit gibi kararlı minerallerin oluşmasıyla puzolanik özellik yok olmaktadır (Baronio ve diğ,



1997). Oluşan amorf ürünler kireç ile reaksiyona girerek, tuğla-kireç ara yüzünde ve tuğla agregaların gözeneklerinde, suda çözünmeyen, jel halindeki kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidratları oluştururlar. Örneğin; kaolinin ısıtılmasıyla oluşan amorf metakaolin ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) (3.1) kireç ve su ile reaksiyona girerek tetrakalsiyum alüminat hidratı ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 19H_2O$ ) ve kalsiyum silikat hidratı ( $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 7H_2O$ ) (3.2) oluşturur (Prince ve diğ, 2001; Lea, 1940).



Hidrolik reaksiyonlar sonucu oluşan kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidratlar sayesinde, harçların dayanımı artmakta ve su altında da sertleşebilmektedirler.

Horasan harçlarında kullanılan tuğla agregaların gözenekli yapısı, karbonatlaşmış kirecin çözülüp tekrar çökmesine olanak tanıyarak bu harç ve sıvaların dayanımını arttırmaktadır (Uğurlu & Böke, 2010)

Böke ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, horasan harçlarının üretim teknolojilerini anlamak, tarihi harçlarla uyumlu tamir harçları üretebilmek amacıyla, birçok tarihi yapıdaki horasan harcının fiziksel ve kimyasal özellikleri, hammadde kompozisyonları, mineralojik ve mikro-yapısal karakteristikleri belirlenmiştir (Uğurlu & Böke, 2010).

Bu çalışmalara göre, horasan harçlarının düşük yoğunluk ve yüksek gözeneklilik değerlerine sahip olduğu, Roma dönemi horasan harçlarının  $1.1-1.6 \text{ gr/cm}^3$  yoğunluk, %30-49 açık gözeneklilik, Osmanlı dönemi horasan harçlarının ise,  $1.2-1.7 \text{ gr/cm}^3$  yoğunluk, %31-54 açık gözeneklilik değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir (Uğurlu & Böke, 2010).

Roma ve Osmanlı dönemi horasan harçlarının hidrolik özellikleri belirli sıcaklıklarda ki ağırlık azalmalarına göre hesaplanmıştır. Buna göre; Roma dönemi horasan harçlarında bu değer 0,9-6,2 arasında, Osmanlı dönemi horasan harçlarında 0,6-9,0

arasındadır. Bu değerlerin 1-10 arasında olması harçların hidrolik karakterde olduğunun kanıtıdır (Uğurlu & Böke, 2010).

Malzeme bazında gerçekleştirilen analizlerde de harcı oluşturan tuğla agregalarda yüksek oranda  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve daha düşük oranlarda  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{CaO}$  tespit edilmiştir (Çizelge 3.1). Bu değerler tuğla agregalarda kullanılan hammadde kaynaklarının kilce zengin olduğunun göstergesidir (Uğurlu & Böke, 2010).

**Çizelge 3.1:** Bazı Roma ve Osmanlı dönemi harçlarında kullanılan tuğla agregaların tespit edilen metal oksit yüzdeleri (Uğurlu & Böke, 2010).

Oksit	Roma dönemi (%)	Osmanlı dönemi (%)
$\text{SiO}_2$	60-75	60-85
$\text{Al}_2\text{O}_3$	13-16	5-14
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5-7	3-8
$\text{Na}_2\text{O}$	0.3-0.7	0.8-2
$\text{K}_2\text{O}$	0.9-3	0.8-4
$\text{CaO}$	0.6-3	1-3

Roma ve Osmanlı dönemi horasan harçlarında bağlayıcı olarak kullanılan kirecin %94 oranında kalsiyum karbonat, %4 oranında silisyum oksit ve %2 oranında alüminyum oksitten oluştuğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar Roma ve Osmanlı döneminde horasan harcı için kullanılan kirecin saf kireç olduğunu göstermektedir (Uğurlu & Böke, 2010).

Bu çalışmalar neticesinde teknik açıdan iyi özellikte bir horasan harcının sahip olması gereken özellikler şu şekilde olmalıdır:

- Horasan harçları yüksek gözeneklilik ve düşük yoğunluk değerlerine sahip olmalıdır (Uğurlu & Böke, 2010).
- Horasan harçları hidrolik özellik göstermelidir (Uğurlu & Böke, 2010).
- Kullanılacak tuğla agregalar için kilce zengin hammadde kaynakları tercih edilmeli, yüksek oranda  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içermelidir. (Uğurlu & Böke, 2010).
- Kullanılan tuğla, kiremit gibi pişmiş toprak ürünleri yeni ve iyi pişirilmiştir olmalı, puzolanik aktivite kazanmış olmalıdır. Buradaki iyi pişirilmeden kasıt, Böke ve arkadaşları tarafından, tuğlanın hammaddesi olan killerin tamamının amorf hale dönüşmesi gerekliliği olarak belirtilmiştir (Akman ve diğ, 1986; Böke ve diğ, 2004).

- Harca karıştırılacak tuğla ve kiremit kırıklarının granülometrileri iyi bir şekilde etüt edilmelidir (Akman ve diğ, 1986).
- Puzolan olarak kullanılacak malzemelerin olabildiğince ince öğütölmesi puzolanik aktiviteyi hızlandırmaktadır (Akman ve diğ, 1986).
- Kullanılan kirecin iyi kalitede saf kireç olmasına dikkat edilmelidir (Uğurlu & Böke, 2010).



#### **4. HORASAN HARÇLARININ ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bu bölümde genel kurallar çerçevesinde, yapay ve doğal puzolanik katkı maddeleri kullanarak ve farklı oranlar belirlenerek horasan harç karışımları hazırlanmış, değişen parametreleri görmek ve tarihi harçlarla kıyaslamak amacıyla deneysel çalışmalara tabi tutulmuştur.

Bu amaçla, öncelikle deneysel akış şeması oluşturulmuştur. Daha sonra kullanılacak malzemeler tanımlanıp ön deneyler yapılmış ve harç karışım oranları belirlenmiştir. Son olarak da hazırlanan harç numuneleri belirlenen deneylere tabi tutulmuştur.

##### **4.1 Deney Programı**

Deneysel çalışmalar için üç seri harç numunesi hazırlanmıştır. Bütün serilerde bağlayıcı olarak kireç, agrega olarak da tane boyut dağılımları ayarlanan tuğla kırığı ve dere kumu belirli oranlarda karıştırılarak kullanılmıştır. Bunun yanı sıra belirlenen serilerde karışım içerisine öğütülmüş puzolanik katkı maddeleri de ilave edilmiş ve değişen parametrelerin belirlenmesi için fiziksel, mekanik ve kimyasal deneylere tabi tutulmuştur. Aynı zamanda, serilerin kendi içinde kullanılan bağlayıcı/agrega oranları da sistematik bir biçimde farklılaştırılarak, sonuçların değişimi gözlenmiştir.

Hazırlanan horasan harcı numuneleri üzerinde uygulanacak deneylerin akış şeması Şekil 4.1’de verilmektedir.

İlk olarak karışımların belirli bir kıvamda hazırlanması için sarsma deneyi yapılmış, sarsma tablası kolu yirmi beş kez çevrildikten sonra harcın yayılma alanının 13 cm olması gerekliliği gözetilmiştir. Hazırlanan harç karışımları 4x4x16 cm lik prizmatik numuneler oluşturacak şekilde, önceden ayarı yapılmış ve yağlanmış kalıplara dökülmüştür. Numuneler birkaç gün prizini alması için ortam koşullarında bırakılmış, daha sonra dikkatlice kalıplardan çıkarılarak 20±3 °C sıcaklıkta ve % 65±5 nem içeren sabit ortam koşullarına alınmıştır. Seçilen numunelerden üçü kalıptan çıkarıldıktan hemen sonra, 7 gün boyunca etüvde 105±5°C’ta bekletilmiş, daha sonra bu numunelerde sabit ortam koşullarına alınmıştır. Bu şekilde bir hafta

boyunca etüvde kurutulan numunelerin, doğrudan sabit ortam koşullarına alınan numunelere göre değişen parametreleri gözlenmiştir.

Her karışımdan fiziksel, mekanik ve kimyasal deneylerde kullanılmak üzere toplam yirmi dörder adet numune dökülmüştür. Ayrıca buhar geçirgenlik deneyinde kullanılmak üzere yine her karışımdan üçer adet, çapı 7 cm ve kalınlığı 1,5 cm olan dairesel numuneler dökülmüştür.

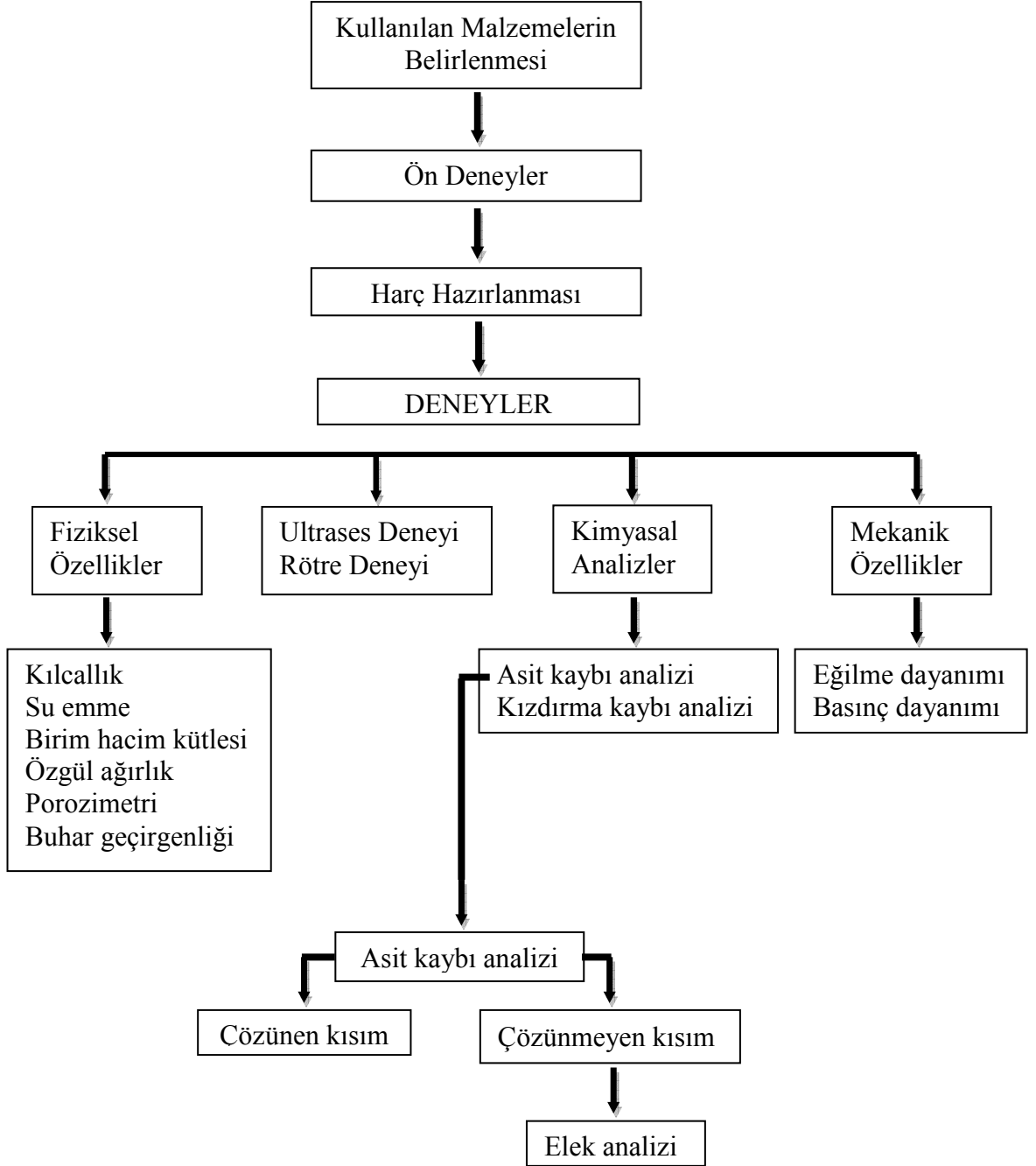
Sonuçların güvenilirliği için, tüm deneylerde her karışımdan üçer adet numune kullanılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Fiziksel deneyler 28. günde prizmatik örnekler üzerinde gerçekleştirilmiş, numunelerin kılcallık katsayıları, su emme, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık ve açık gözeneklilik değerleri tespit edilmiştir. Ultra ses hızı tayini ve mekanik deneyler 28, 60 ve 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş, eğilme deneyi sonrasında ikiye bölünen numuneler üzerinde basınç deneyi uygulanmıştır. Buhar geçirgenlik deneyi için dairesel numuneler on gün boyunca aynı saatlerde hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür. Rötire deneyinde de 3'er adet prizmatik numunenin kalıplardan çıktıktan sonra her gün ölçümleri yapılmış, daha sonra bu ölçümler seyrekleştirilmiştir.

Son olarak hazırlanan harç numunelerinin karakteristik özelliklerinin saptanması ve bileşen özelliklerinin belirlenmesi için, kimyasal analiz çalışmaları yürütülmüştür.

Harç numunelerinin bağlayıcı/agrega oranlarının tespiti için asit kaybı analizi yapılmış bu analiz sonrasında elde edilen çözünmeyen kısmın içerdiği siliktağı agregaların ve hem dolgu, hem de katkı maddesi olarak kullanılan puzolanik malzemelerin tane boyut dağılımları ve incelik modüllerini belirlemek için de elek analizi uygulanmıştır. Bu yöntemler tarihi harçların bileşen cinsleri ve oranları hakkında bilinmeyen değerlerin tespiti için yapılmaktadır. Bizim hazırladığımız, önceden bileşen cinsleri ve oranları bilinen harçların üzerinde yapılan bu deneyler ile test yöntemlerinin de değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla analizler için her karışımdan üç farklı miktarda numune alınmış, her biri üzerinde aynı test işlemleri uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Harç numunelerinin, hidrolik özelliklerinin tespiti ve harç içerisindeki molekül bağ suyu ve karbonat miktarı tayini için kızdırma kaybı analizi gerçekleştirilmiştir. 110°C, 550°C ve 950°C'ta etüvde ve kül fırınında kızdırılan numunelerin bu sıcaklıklardaki kütle kayıplarından sonuçlar elde edilmiştir. Kızdırma kaybı

analizinde de, her karışımdan iki farklı miktarda numune alınmış, her biri üzerinde aynı test işlemleri uygulanmış, sonuçların ve deney yönteminin değerlendirilmesi yapılmıştır.



**Şekil 4.1 :** Horasan harçlarının özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneysel çalışma şeması.

## 4.2 Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması: Ön Deneyler

Hazırlanan harç numunelerinde oluşturulan gruplara göre değişmek suretiyle, bağlayıcı olarak kireç, agrega olarak kum ve tuğla kırığı ve katkı maddesi olarak öğütülmüş ponza taşı tozu ve tuğla tozu kullanılmıştır. Karışımlara gerekli miktarda su ilave edilmiştir. Hazırlanacak harçlarda kullanılacak bileşenlerin, yapısal özelliklerini tanımlamak ve karışımlarda hangi miktarlarda kullanılması gerektiğini tespit etmek için, bileşenler üzerinde bazı ön deneyler gerçekleştirilmiştir.

### 4.2.1 Agreganın özellikleri

Agrega olarak dere kumu ve tuğla kırığı kullanılmıştır. Dere kumları sürekli granülometrilik ve deniz kumuna göre nispeten daha az boşluklu kumlardır. Tuğla kırığı içinde iyi pişmiş harman tuğlası kullanılmıştır (Akman ve diğ., 1986). Bu agregalar, harç bileşeni olarak kullanılmadan önce sabit kütleye<sup>1</sup> gelecek şekilde etüvde kurutulmuştur. Daha sonra kuma ve tuğla kırığına özgül ağırlık, birim hacim ağırlık deneyleri ve elek analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, en ideal agrega karışımını oluşturmak amacıyla, %70 horasan (tuğla kırığı) ve %30 dere kumundan oluşan agrega karışımı harç karışımlarında kullanılmıştır.

Ayrıca kullanılan tuğla kırığının puzolanik etkisini ölçmek için TS 25'e göre puzolanik aktivite analizine tabi tutulmuştur. Bu kısım Bölüm 4.2.3'deki puzolanın özellikleri başlığı altında anlatılmaktadır.

#### 4.2.1.1 Özgül ağırlık tayini

Özgül ağırlık tayinini hesaplamak için piknometre prensibi uygulanmaktadır (TS EN 1936, 2010). Bu prensibe göre malzemenin toz (pülverize) halde olması gerekmektedir. Buna göre bir miktar malzeme, 0,063 mm lik elekten geçecek şekilde öğütülür ve sabit kütleye gelinceye kadar kurutulur, tartılır ( $W_0$ ). Tamamen su ile dolu kavanoz, üzeri hava almayacak şekilde yerleştirilen cam kapak ile kapatılır ve tartılır ( $W_1$ ). Daha sonra kavanozun içerisinden bir miktar su boşaltılıp, ağırlığı bilinen öğütülmüş malzeme içerisine eklenir ve tekrar su ile ağzına kadar doldurulur ve katı madde çöküp su berrak hale gelinceye kadar beklenir. Ardından kavanoz su

---

<sup>1</sup> Malzemenin, sıcaklığın  $70\pm 5$  °C'a ayarlanmış havalandırılmalı etüvde birbirini zleyen 24±2 saat aralıklı kurutulmalardan sonra bulunan kütleleri arasındaki farkın son tartımın %0,1'ini aşmadığı andaki kütlelerine sabit kütle denir (TS EN 1936, 2010).



ile tamamen doldurulur ve cam kapakla hava almayacak şekilde kapatılır. Taşan su varsa yavaşça kurulanır ve  $\pm 0,01$  g doğrulukla tartılır ( $W_2$ ). Deneyde kullanılan su saf sudur (TS EN 1936, 2010). Buna göre;

$$W_0 + W_1 = W_2 + V \quad (4.1)$$

$$\delta = \frac{W_0}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (4.2)$$

V= Kütle tarafından yeri değiştirilen sıvı hacmi

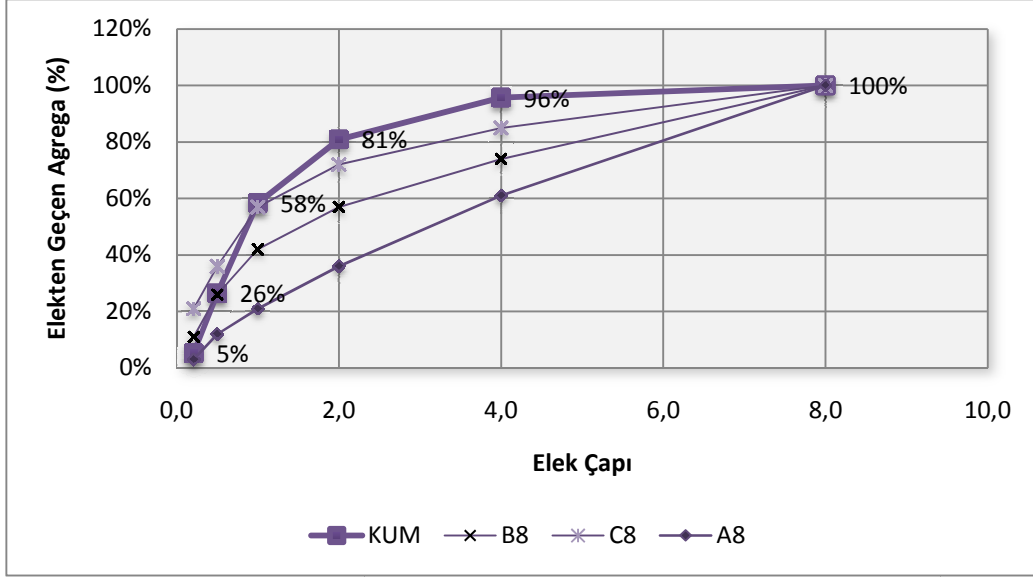
$\delta$  = Özgül ağırlık

Yapılan hesaplamalara göre kumun özgül ağırlığını  $2,60 \text{ gr/cm}^3$ , tuğla kırığının özgül ağırlığı  $2,73 \text{ gr/cm}^3$  olarak bulunmuştur.

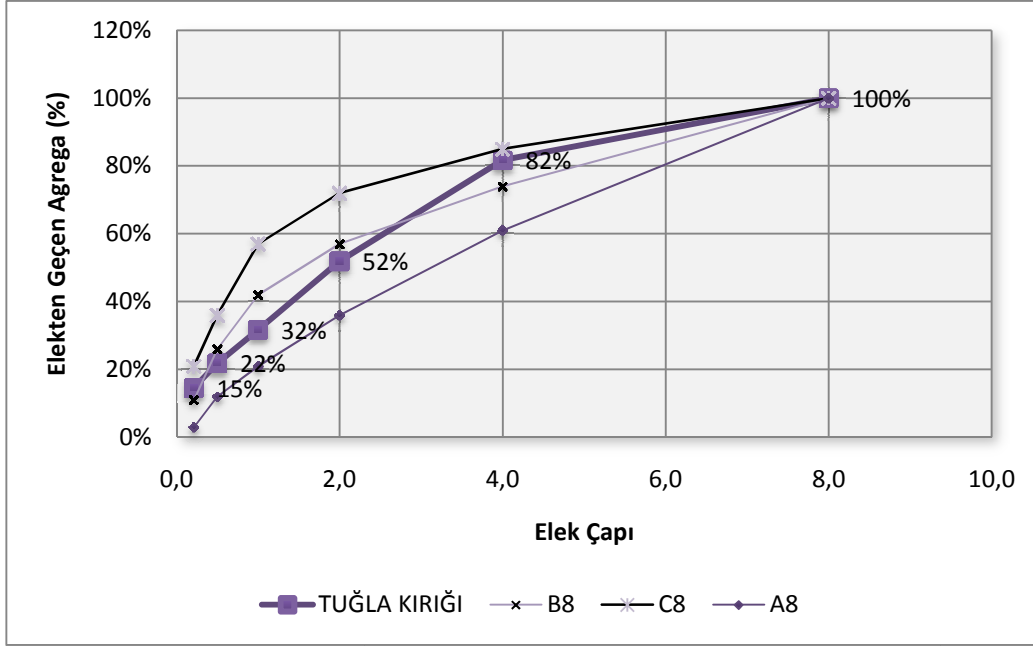
#### 4.2.1.2 Elek analizi

Harç numuneleri için kullanılacak agregaların tane boyutu dağılımlarını ve incelik modüllerini belirlemek için elek analizi yapılmaktadır. Öncelikle kullanılacak agregaya yıkanır ve etüvde bekletilerek iyice kurutulur. Ardından, harca katılması gereken maksimum tane boyutu belirlenir ve buna bağlı olarak kullanılacak elekler seçilir. Büyükten küçüğe doğru sıralanmış 16, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.250, 0.125, 0.063 mm veya istenilen diğer büyüklüklerde elekler kullanılarak analize başlanmaktadır (RILEM, 2005).

Hazırlanacak horasan harcına katılacak dere kumunun ve tuğla kırığının maksimum tane boyutu 8 mm olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak iki tip agregaya da 8.00, 4.00, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.250 mm ölçüsünde olan eleklerden en büyüğüne dökülerek elenmiş ve her elek üzerinde kalan miktar tartılıp kaydedilmiştir. Bulunan sonuçlara göre her malzeme için elekten geçen malzeme yüzdesi diyagramda gösterilmiş ve Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'deki gibi agregaların granülometri eğrisi çizilmiştir.



Şekil 4.2 : Dere kumun granülometri eğrisi.

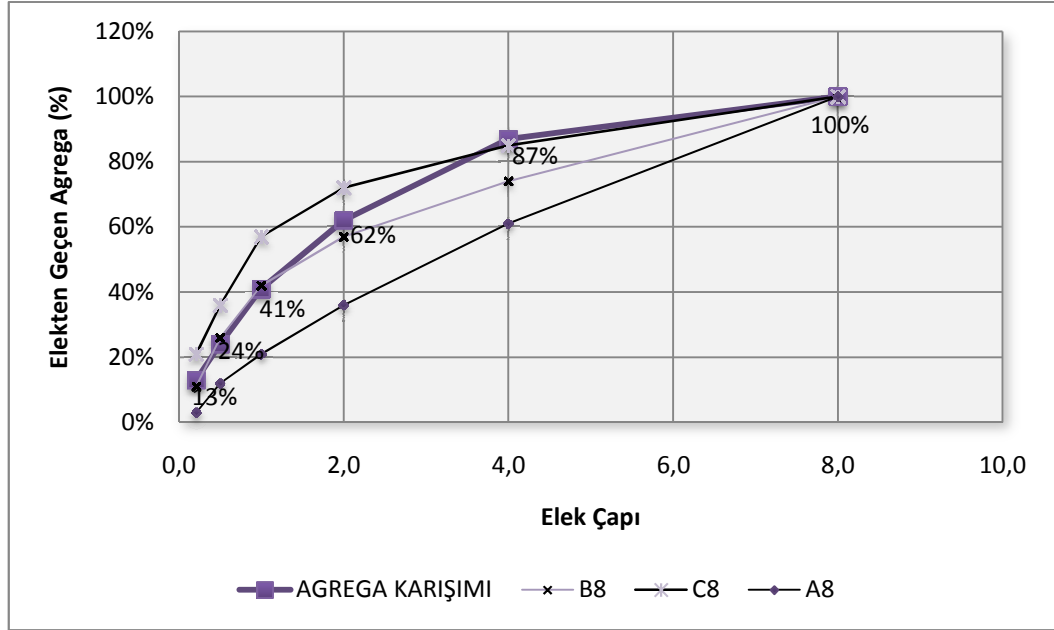


Şekil 4.3 : Tuğla kırığının granülometri eğrisi.

Agregaların ayrı ayrı granülometrik analizi yapıldıktan sonra, dere kumu ve tuğla kırığı, karışım için en ideal oranı sağlayacak şekilde sırasıyla %30 ve %70 oranlarında karıştırılmış ve karışımın tane boyut dağılımı bulunmuştur (Çizelge 4.1) (Şekil 4.4).

**Çizelge 4.1** : Agrega karışımının (tuğla kırığı+dere kumu) tane boyut dağılım yüzdesi.

ELEK BOYUTU (mm)	8,0	4,0	2,0	1,0	0,5	0,2
ELEKTEN GEÇEN (%)	100	87	62	41	24	13



**Şekil 4.4** : Agrega karışımının granülometri eğrisi.

#### 4.2.1.3 Birim hacim ağırlık tayini

Kuru numune kütlesinin görünür hacmine oranı birim hacim kütlesini vermektedir (TS EN 1936, 2010). Bu analizi yaparken doğal ve yapay agreganın sıkışık ve gevşek birim hacim ağırlıkları tayin edilir ve bulunan iki değer ortalama alınır. Ölçüm için ağırlığı ve hacmi bilinen birim hacim ağırlık kabı kullanılır.

Önceden ağırlığı ( $W_1$ ) ve hacmi ( $V$ ) bilinen birim hacim ağırlık kabının içerisine, azar azar eklemek suretiyle agrega konulmuş, her ekleden sonra kap zemine vurularak malzemenin iyice sıkışması sağlanmıştır. Agrega dolu kap tartılmış, toplam ağırlıktan kabın ağırlığı çıkartılarak agreganın ağırlığı tespit edilmiştir ( $W_2$ ). Agreganın ağırlığı, kabın hacmine bölündüğünde agreganın sıkışık birim hacim ağırlığı bulunmuştur ( $\Delta_s$ ). Aynı işlem malzemeyi kaba koyarken sıkıştırma işlemi yapmadan tekrarlanmış ve agreganın gevşek birim hacim ağırlığı tespit edilmiştir ( $\Delta_g$ ). Sıkışık ve gevşek birim hacim ağırlıklarının ortalaması alınarak agreganın birim

hacim ağırlık değeri bulunmuştur. Bu iki tayin işlemi de hem kum hem de tuğla kırığı için tekrarlanmıştır.

$$\Delta_{s,g} = \frac{(W_2+W_1)-W_1}{V} \quad (4.3)$$

Buna göre kumun birim hacim ağırlığı 1,65 gr/cm<sup>3</sup>, tuğla kırığının birim hacim ağırlığı 1,08 gr/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur.

#### **4.2.2 Kirecin özellikleri**

Kireç olarak Muğla yöresine ait saf kireç kullanılmıştır. Sönmemiş kütle halindeki kireç öncelikle su ile söndürülmüş ve bir hafta bekletilmiştir. Oluşan kireç kaymağı üzerinde, öz ağırlık ve su oranı tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir.

##### **4.2.2.1 Özgül ağırlık tayini**

Kullanılacak olan söndürülmüş kireçten bir miktar alınarak etüvde 105°C de 24 saat kurutulur ve daha sonra 0,063 mm lik elekten geçecek şekilde öğütülür. Piknometre prensibi ile yapılan deney sonucunda bulunan değerlere göre kirecin özgül ağırlığı 2,17 gr/cm<sup>3</sup> bulunmuştur.

##### **4.2.2.2 Su oranı tayini**

Boş bir kaba ağırlığı önceden tespit edilen kireç kaymağı konulur. Daha sonra ağırlığı sabit hale gelene kadar kurutulup, soğuması için desikatörde bekletilir ve tartılır. Ortaya çıkan ağırlık kaybı kirecin içerdiği su miktarıdır.

Bu analiz 3 kere yapılarak sonucun güvenilirliği için bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır. Buna göre, kirecin %52 su, %48 kuru kireç ihtiva ettiği bulunmuştur.

#### **4.2.3 Puzolanın özellikleri**

Hazırlanacak serilerde puzolan olarak, harman tuğlası ve Kars yöresine ait ponza taşı kullanılmıştır.

Ponza taşı, ülkemizde de yaygın olarak bulunan doğal bir puzolandır ve ince bir şekilde öğütülerek kullanıldığında harç karışımları için uygun bir katkı maddesidir (Ersen, Karagüler, & Güleç, 1995). Puzolanik malzemenin incelik esası, 90um lik elek üzerinde kalan kısmının %0,6 dan daha az, 200 um lik elek üzerinde kalan

kısımının da %8 den daha az olması koşuluna göre belirlenmektedir (TS 25, 2008; Ersen ve diğ, 1995).

Hem katkı hem de dolgu maddesi olarak kullanılacak harman tuğlası kırıkları ise yapay bir puzolandır ve pişirilme esasına ve içeriğindeki bileşenlere bağlı olarak puzolanik özelliğe sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle harç karışımlarını hazırlamadan önce kullanılacak bütün katkı maddelerinin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve puzolanik özelliğe sahip olup olmadığının tespiti için ön deneylerin yapılması gerekmektedir.

#### 4.2.3.1 Kimyasal özellikleri

TS 25'in belirttiği üzere doğal puzolanın kimyasal özellikleri Çizelge 4.2'de verilen değerleri sağlamalıdır. Bu değerler malzemeye uygulanan kimyasal analizler sonucunda elde edilmektedir (TS 25, 2008).

**Çizelge 4.2** : Doğal puzolanın kimyasal özellikleri ve gerekler (TS 25, 2008).

Kimyasal özellik		Kütlece(%)
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	En az	70,0
$SO_3$	En çok	3,0
Reaktif silis	En az	25,0
Klorür	En çok	0,1

#### 4.2.3.2 Fiziksel özellikler

*Özgül ağırlık tayini:*

Karışımlarda puzolan olarak kullanılacak, Kars yöresine ait ponza taşı ile harman tuğlası öğütülerek toz haline getirilmiş ve 0,063 mm lik elekten elenmiştir (TS EN 1936, 2010). Piknometre prensibi ile yapılan deney sonucunda bulunan değerlere göre ponza tozunun özgül ağırlığı  $2,37 \text{ gr/cm}^3$ , tuğla tozunun özgül ağırlığı  $2,73 \text{ gr/cm}^3$  olarak hesaplanmıştır.

*Birim hacim ağırlık tayini:*

Karışımlarda kullanılacak Kars yöresine ait ponza taşı tozunun ve tuğla tozunun birim hacim ağırlıkları, birim hacim ağırlık kabı ile hesaplanmış ve sırasıyla  $0,98 \text{ gr/cm}^3$  ve  $1,07 \text{ gr/cm}^3$  olarak bulunmuştur (TS EN 1936, 2010).

### *Puzolanik aktivite analizi:*

Harç karışımlarında harca hidrolik özellik kazandırmak ve dayanımını arttırmak amacıyla doğal veya yapay puzolanlar kullanılmaktadır (Lea, 1940). Puzolanik aktivite, puzolanın, belirli bir incelikte öğütüldüğünde, su ve sönmüş kireç  $\text{Ca(OH)}_2$  ile oluşturduğu karışımın basınç dayanımı cinsinden tespit edilen hidrolik özelliğidir (TS 25, 2008). Bu nedenle kullanılacak olan puzolanlarda bu özelliğin sağlanıp sağlanmadığının harç karışımını hazırlamadan önce tespit edilmesi gerekmektedir.

Puzolanik aktivite analizi için hazırlanacak harç, puzolan, sönmüş kireç  $\text{Ca(OH)}_2$  ve standart kum kullanılarak hazırlanmaktadır. Kullanılması gereken miktarlar Çizelge 4.3'de belirtilmiştir. Deney numuneleri,  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 'taki hava dolaşımli etüvde sabit kütleye ulaşmaya kadar kurutulur ve daha sonra kuru şartlarda, laboratuvar ortam sıcaklığına kadar soğutulması gerekir. Hazırlanacak her karışımdan 3'er adet üretilmeli ve sonuçların ortalaması alınmalıdır. Kalıpların üstü buharlaşmayı önleyecek şekilde 210 mm x 185 mm ölçüsünde 6 mm kalınlığındaki cam plaka ile kapatılır ve numuneler 24 saat  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 'lık oda sıcaklığında bekletilir. 24 saat sonunda kalıplar sökülmeden  $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki bir etüv içinde 6 gün daha bekletilir (TS 25, 2008).

Numuneler etüvden çıkartılarak oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılır. En az 4 saatlik bu süre sonunda numuneler, TS EN 196-1'e göre basınç dayanımı deneyine tabi tutulur (TS 25, 2008).

**Çizelge 4.3 :** Puzolanik aktivite analizi için kullanılması gereken malzeme miktarları (TS 25, 2008).

Malzeme	Kullanılacak miktar (gr)
Sönmüş kireç, $\text{Ca(OH)}_2$	150
Doğal puzolan	$T=2 \times 150$ (doğal puzolan yoğunluğu/sönmüş kireç yoğunluğu)
Standart kum	1350
Su	0,5 (150+T)

Hazırlanacak horasan harçlarında doğal puzolan olarak ponza tozu, yapay puzolan olarak tuğla tozu kullanılmıştır. Çizelge 4.4'de verilen değer, TS 25'de belirtilen doğal puzolan için geçerli olan 7 günlük basınç ve eğilme dayanımı değerleridir. Bu nedenle yapay puzolanın da yaklaşık olarak bu değeri sağlaması gerekmektedir.

**Çizelge 4.4 :** Kireç-doğal puzolan karışımı ile hazırlanan deney numunelerin 7 günlük basınç dayanımı (TS 25, 2008).

Fiziksel özellik		Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
Puzolanik aktivite	En az	4,0	1,0

Belirtilen oranlara göre hazırlanan harç numunelerinden elde edilen detaylı sonuçlar Çizelge A.1’de verilmiştir. Elde edilen eğilme ve basınç dayanım sonuçları ise Çizelge 4.5’de yer almaktadır. Bu sonuçlara göre ponza ve tuğla tozu ile hazırlanan kireç harçlarındaki basınç dayanım değerlerinin 4,0 MPa üzerinde, eğilme dayanım değerlerinin de 1,0 MPa üzerinde olduğu ve harçların puzolanik etki gösterdiği tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.5 :** Ponza tozu + Kireç harcı 7. gün eğilme ve basınç dayanım değerleri / Tuğla tozu + Kireç harcı 7. gün eğilme ve basınç dayanım değerleri.

	7. Gün Eğilme (MPa)	7. Gün Basınç (MPa)
Ponza tozu + Kireç harcı	2,66	7,49
Tuğla tozu + Kireç harcı	2,49	9,2

### 4.3 Harç Karışım Oran ve Özellikleri

Hazırlanacak harçlarda, deney sonuçları iki farklı parametreye göre değerlendirilmek istenmektedir. Birincisi, numunelerdeki fiziksel ve mekanik değişiklikleri incelemek için horasan harcına iki tür öğütülmüş puzolanın ilave edilmesi, diğeri ise her serinin kendi içinde de malzeme oranlarının değiştirilmesidir.

Deneyleerde kullanılacak numuneler, içerisine katılan malzemeye göre seri 1 (KH), seri 2 (KPPTH) ve seri 3 (KTTH) şeklinde isimlendirilirken, bağlayıcı/agrega oranına göre de 1,2 ve 3 şeklinde numaralandırılmıştır. Çizelge 4.6’de ve Çizelge 4.7’de harç karışım oranları ve miktarları verilmektedir.

Hazırlanan tüm serilerdeki harçlar horasan harcı olduğu için agrega olarak kullanılan tuğla kırığının oranı (%70), kumun oranına (%30) göre daha fazla tutulmuştur. Bununla birlikte bütün karışımlarda agregaların tane boyut dağılımlarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

Seri 1’de (KH) hazırlanan horasan harcında, karışımın içerisine bağlayıcı olarak kireç, agrega olarak dere kumu ve tuğla kırığı katılmıştır. Bu serideki harç karışımlarına hiçbir katkı maddesi ilave edilmemiş, diğer serilerde harca katkı maddelerinin eklenmesiyle meydana gelecek değişikliklerin karşılaştırmasını yapmak amaçlanmıştır. Seri içerisindeki numaralandırma bağlayıcı/agrega oranının farklılaşmasına göre yapılmış, 1:2, 1:3, 1:4 oranları kullanılmıştır.

Seri 2’de harcın içerisine bağlayıcı olarak kireç ve öğütülmüş ponza taşı tozu ilave edilmiş, agrega olarak seri 1 deki oranlarda dere kumu ve tuğla kırığı katılmıştır. Bu seride kullanılan kireç, seri 1 e göre ağırlıkça %20 azaltılmış, azalan oranda puzolan (öğütülmüş ponza taşı tozu) harca katılarak, bağlayıcı (kireç+puzolan) oranının 1 olmasına dikkat edilmiştir. Böylece seri 1 ile aynı bağlayıcı/agrega oranları (1:2, 1:3 ve 1:4) sağlanmıştır.

Seri 3’de harcın içerisine bağlayıcı olarak kireç ve öğütülmüş tuğla tozu katılmış, agrega olarak seri 1 ve seri 2 ile aynı oranlarda dere kumu ve tuğla kırığı ilave edilmiştir. Kullanılan kireç seri 1 e göre ağırlıkça %20 azaltılmış, azalan oranda puzolan (öğütülmüş tuğla tozu) harca ilave edilerek, bağlayıcı (kireç+puzolan) oranının 1 olmasına dikkat edilmiştir. Böylece bağlayıcı/agrega oranının (1:2, 1:3 ve 1:4) seri 1 ve seri 2 ile aynı olması sağlanmıştır.

Karışımlar hazırlanırken ilk olarak kuru malzemeler karıştırılmış, ardından sıvı malzemeler eklenmiştir. Eklenen su bütün serilerde kütlece sabit miktarda tutulmuştur. Karışım homojen bir hale gelinceye kadar karıştırılmış, sarsma deneyi ile kıvam tayini yapıldıktan sonra, önceden ayarı yapılmış ve yağlanmış sekiz adet kalıba dökülerek üzerleri mala ile düzeltilmiştir. Numuneler birkaç gün prizini alacak şekilde bırakılmış, daha sonra dikkatlice kalıplardan çıkartılmıştır. Bu numunelerden seçilen üç tanesi 7 gün boyunca etüvde  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  de bekletilmiş, diğer kalıplardan çıkan numuneler sabit ortam koşullarının sağlanması için sıcaklığı ve nemi sabit bir odaya alınmış ve her gün yüzeyi çevrilerek kurumaya sağlanmıştır. 7 gün sonrasında, etüvden çıkan numuneler de sabit ortam koşullarına alınmış ve kurumaya bırakılmıştır.



Çizelge 4.6 : Harç karışım oranları (ağırlıkça).

KARIŞIMIN ADI	BAĞLAYICI			AGREGA			SU		
	KİREÇ (g)	TUĞLA TOZU (g)	PONZA TAŞI TOZU (g)	KUM (g)	TUĞLA KIRIĞI (g)	KİREÇ SUYU (ml)	EKLENEN SU (ml)	TOPLAM SU (ml)	
SERİ 1	1	-	-	0,6	1,4	3607,5	kullanılmadı	3607,5	
	1	-	-	0,9	2,1	2686,0		3607,5	
	1	-	-	1,2	2,8	2351,0		3607,5	
SERİ 2	0,8	-	0,2	0,6	1,4	2838,3	540,4	3378,7	
	0,8	-	0,2	0,9	2,1	2318,3	1060,4	3378,7	
	0,8	-	0,2	1,2	2,8	1852,5	1526,2	3378,7	
SERİ 3	0,8	0,2	-	0,6	1,4	2838,3	627,0	3465,3	
	0,8	0,2	-	0,9	2,1	2329,2	1136,2	3465,3	
	0,8	0,2	-	1,2	2,8	1863,3	1602,0	3465,3	

Çizelge 4.7 : Harç karışım miktarları.

KARIŞIMIN ADI	BAĞLAYICI			AGREGA			SU		
	KİREÇ (g)	TUĞLA TOZU (g)	PONZA TAŞI TOZU (g)	KUM (g)	TUĞLA KIRIĞI (g)	KİREÇ SUYU (ml)	EKLENEN SU (ml)	TOPLAM SU (ml)	
SERİ 1	KH1 (1:2)	-	-	1990,0	4660	3607,5	kullanılmadı	3607,5	
	KH2 (1:3)	-	-	2230,0	5200	2686,0	921,5	3607,5	
	KH3 (1:4)	-	-	2600,0	6080	2351,0	1256,5	3607,5	
SERİ 2	KPTTH1 (1:2)	-	650,0	1960,0	4580	2838,3	540,4	3378,7	
	KPTTH2 (1:3)	-	540,0	2410,0	5630	2318,3	1060,4	3378,7	
	KPTTH3 (1:4)	-	430,0	2570,0	5990	1852,5	1526,2	3378,7	
SERİ 3	KTTH1 (1:2)	660,0	-	1970,0	4590	2838,3	627,0	3465,3	
	KTTH2 (1:3)	540,0	-	2420,0	5650	2329,2	1136,2	3465,3	
	KTTH3 (1:4)	430,0	-	2580,0	6020	1863,3	1602,0	3465,3	

## 4.4 Deneyler

### 4.4.1 Rötire deneyi

Rötire deneyi için önceden yağlanmış ve pimleri takılmış 4x4x16cm lik standart prizmatik kalıplar hazırlanmıştır. Hazırlanan harç karışımları, her seri numarası için 3 er adet numune oluşturacak şekilde, kalıplara dökülmüş, üzeri mala ile düzeltilerek iki veya üç gün prizini alması beklenmiştir. Harç numuneleri kalıplardan çıkartıldıktan sonra rötiresi ölçülmeye başlanmıştır.

Ölçümler Şekil 4.5’de gösterilen Alşa Firmasının ürettiği rötire aleti ile yapılmıştır. Bir ay süresince, ilk zamanlar her gün daha sonra gün aşırı ölçümler yapılmış ve her serinin değişen rötire değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 4.5 : Rötire deney aleti.

### 4.4.2 Ultrases hızı deneyi

Duyulabilen ses titreşimleri 16-16.000 Hz arasında bulunmaktadır. Frekansı 16.000 in üzerinde olan ve kulakla duyulamayacak ses dalgalarına “ultrases” denilmektedir. Bu dalgaların yayılabilmesi için cismin katı, sıvı veya gaz halde olması gerekmekte, aksi halde ultrases dalgaları boşlukta yayılmamaktadır (Postacıoğlu, 1981).

Kullanım alanları çok fazla olan ultrases yöntemi, 1880’de Curie’ler tarafından keşfedilen piezoelektrik olaylar sayesinde çalışmaktadır. Beton üzerine uygulanan, mekanik yolla oluşturulan titreşimlerin hız ölçümleri ise ilk defa USA’da 1940’lı yılların ortalarında rapor edilmiştir. Test metodunun uygulanmaya başlanmasının ilk yıllarında ölçüm konusunda problemler yaşanmıştır ancak birkaç yıl sonra Fransa’da mekanik titreşim cihazı geliştirilmiş ve bu test metodu zamanla modern ultra ses metodu haline gelmiştir. Günümüzde, beton testleri büyük oranda, içinden geçme tekniğini (through-transmission techniques) kullanan titreşim hız ölçümlerine dayanmaktadır (Bungey ve diğ, 2006).

Cismin içinde ultrases hızının tayini için; prizma şeklinde ve belirli bir L uzunluğunda numune alınarak, bunun bir ucuna prob denilen ultrases üreten verici, diğer ucuna da malzeme içinden geçen ses dalgalarını toplayan alıcı yerleştirilmektedir (Şekil 4.6). Ses dalgaları, alıcı prob tarafından toplanır ve ossilografa aktarılarak, sesin iki uç arasında geçiş süresi saniyenin milyonda biri olan mikrosaniye cinsinden tespit edilir. Buna bağlı olarak ses geçiş hızı aşağıdaki formül ile hesap edilmektedir (4.4) (Postacıoğlu, 1981; TS EN 14579, 2006).

$$V = L/t_1 \quad (4.4)$$

V: Ultrases hızı (km/s)

L: Ses hızının geçtiği numune boyu (mm)

t<sub>1</sub>: Uzunluk boyunca sinyalin aldığı yol (μs)



Şekil 4.6 : Laboratuvar koşullarında ki test düzeneği (Bungey ve diğ, 2006).

Ultrases deney metodunu uygularken bazı hususlara dikkat etmek gerekmektedir. Bunların en önemlisi, alıcı ve verici probların malzemeye temas ettikleri yüzeylerde boşluk kalmamasıdır. Ara yüzeyde bir boşluk bulunması durumunda ultrases dalgaları yansıyacağı için ses dalgalarını cismin içine sokmak mümkün olmayacaktır. Bu nedenle boşluk kalmasını engellemek için alıcı ve verici ile malzeme yüzeyi arasına boşluğu dolduracak vazelin, sıvı sabun ve makine yağı gibi malzemelerin sürülmesi gerekmektedir (Postacıoğlu, 1981; Bungey ve diğ, 2006).

İkinci önemli nokta, deney yapılacak numune uzunluğunun (L), belirli bir değerin altına düşmemesidir. Üretilecek malzemedeki kullanılan en büyük agrega boyutunu D kabul edersek,  $L_{\min} = 3,5D$  olmalıdır. Numunenin L uzunluğu  $L_{\min}$  den daha kısa olduğu takdirde, bulunan ultrases değerlerinde sapmalar meydana gelebilmektedir (Postacıoğlu, 1981).

Ultrases hızı deneyi sonucunda bulunan V hızı, malzemenin cinsi ve yapısal özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Ses dalgaları, yörüngelerinde bir boşluğun bulunması durumunda, bu boşluğu geçemeyerek çevresinden dolanırlar. Bu durum, malzemenin bir ucundan diğer ucuna ses geçiş süresinin uzamasına, dolayısıyla ses geçiş hızının azalmasına neden olmaktadır. Ses geçiş hızının çok düşük değerlerde olması, malzemenin yapısında çok fazla boşluk olduğunun göstergesidir (Postacıoğlu, 1981).

Ultrases hızının tespiti, malzemenin boşluk yapısı ile birlikte, malzemedeki çatlak oluşumu, bozulmalar, katman kalınlığı, elastiklik modülü, dayanım ve dayanım artışının takibi gibi konularda da bilgi vermektedir (Bungey ve diğ, 2006). Ancak elde edilen mukavemet değerleri yaklaşık olarak belirlenebilmektedir. Boşluk miktarına bağlı olarak malzeme mukavemetini daha az hata payı ile tahmin etmek istersek, malzemenin yaşı, bağlayıcı dozajı ve su/bağlayıcı oranı gibi faktörleri de göz önünde bulundurmak gerekmektedir (Postacıoğlu, 1981).

Bu bilgiler doğrultusunda, ultrases hızı deneyleri, 4x4x16cm lik prizmatik numuneler üzerinde 28., 60. ve 90. günlerde ve 7 gün etüvde bekletilmiş numune üzerinde 28. günde yapılmıştır. Seri numaralarına göre değişen sonuçlar belirlenmiştir.

Ölçümler Şekil 4.7’de gösterilen Scheid Euromatest firmasının ürettiği DIGI EG-c2 cihazı ile tespit edilmiştir.



**Şekil 4.7 :** Ultrases hızı ölçüm cihazı.

#### **4.4.3 Fiziksel deneyler**

28 günlük 4x4x16 cm lik prizmatik harç numuneleri üzerinde, TS EN 1925, TS EN 1936, TS EN 13755, TS EN 1015 ve TS EN 12086 standartlarına göre kılcallık, su emme, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, açık gözeneklilik ve buhar geçirgenlik deneyleri yapılmış sonuçlar grafiklere aktarılmış ve değerlendirilmiştir. Sonuçların güvenilirliğini arttırmak açısından her karışımdan üç adet numune üzerinde deneyler yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır.

##### **4.4.3.1 Kılcallık deneyi**

Kılcallık deneyinde, sabit kütleye kadar kurutulan deney numunesinin yüzeylerinden bir tanesi,  $3\pm 1$  mm su içerisinde daldırılarak su emdirilir ve kütledeki artış zamanın fonksiyonu olarak ölçülür (TS EN 1925, 2000).

Kurutma sonrasında numunenin su emdirilecek yüzeyinin alanı hesaplanır. Numune su haznesindeki kısmen mesnet vazifesi görecek dayanakların üzerine oturtulur. Ardından numunenin tabanı  $3\pm 1$  mm su içerisinde daldırılır ve kronometre çalıştırılır. Deney boyunca gerektiği kadar su eklenerek, haznedeki su seviyesinin sabit tutulması sağlanmalıdır. Başlangıçta çok kısa daha sonra gittikçe uzayacak şekilde belirlenen zaman aralıklarında numune sudan çıkarılır ve üzerindeki su damlacıkları

hafifçe kurularak 0,01 gr yaklaşımla tartılır. Her bir tartım arasındaki zaman aralığı kaydedilir (TS EN 1925, 2000).

Zaman aralıkları için uygun süreler 2, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144 ve 169 dk olacak şekilde belirlenmiştir.

Bu bilgiler doğrultusunda, 28 günlük 4x4x16cm boyutundaki numunelerin kuru olarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Bu numuneler üzerinde kılcallık deneyine başlanmış ve belirlenen dakikalarda ölçülen ağırlıkları kaydedilmiştir. Numunelerin emdikleri suyun miktarına ve süreye bağlı olarak, belirli formüllerle kılcallık katsayıları belirlenmiştir (4.5).

$$E = \frac{Q}{A}, \quad E = N \cdot \sqrt{t}, \quad N = \frac{Q}{\sqrt{t} \cdot A} \quad (4.5)$$

Q : emilen suyun ağırlığı (cm<sup>3</sup>),

A : su değen yüzeyin alanı (cm<sup>2</sup>),

N : kılcallık katsayısı (cm/ $\sqrt{\text{dak.}}$ ),

t : zaman (dakika olarak alınmıştır).

#### 4.4.3.2 Su emme deneyi

Su emme deneyine başlamadan önce numuneler 70±5°C’da sabit kütleye ulaşmaya kadar 24 saat kurutulur. Birbirini izleyen (24 ± 2) saat aralıklı iki tartım arasındaki fark, numune kütlesinin % 0,1’inden büyük değilse, numunenin sabit kütleye ulaştığı kabul edilir. Numuneler desikatörde soğutulduktan sonra kuru ağırlıkları ölçülür (W<sub>0</sub>) (TS EN 1936, 2010; TS EN 13755, 2009; TS EN 1015-10, 2001).

Daha sonra numuneler, su tankı içerisine yerleştirilir ve numunenin yarı yüksekliğine gelecek şekilde sıcaklığı 20±10°C’lık damıtılmış su ilave edilir. En az 60±5 dakika bekledikten sonra numunenin yüksekliğinin dörtte üçü su içerisinde kalacak şekilde su eklenir. 60±5 dakika daha bekledikten sonra numuneler üzerinde 2 cm su olacak şekilde tamamen suya batırılır. Numuneler 48±2 saat su içerisinde bekletildikten sonra hızlı bir şekilde nemli bir bezle kurular ve ağırlığı kaydedilerek tekrar suya batırılır. 24±2 saat sonra tekrar ölçülen ağırlığı %1 den daha fazla değişim göstermiyorsa işlem tamamlanır. Sudan çıkarılan numuneler tekrar hızlı bir şekilde nemli bir bezle kurular ve suya doymuş numunenin kütlesi tayin edilir (W<sub>1</sub>). Daha

sonra su içinde tartılır ve sudaki kütle kaydedilir ( $W_2$ ) (TS EN 1936, 2010; TS EN 1015-10, 2001; TS EN 13755, 2009).

Bu işlemler 4x4x16cm boyutundaki 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve su emme yüzdesi formüllerine göre sonuçlar hesaplanmıştır (TS EN 13755, 2009).

$$A_b = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (4.6)$$

$$A_h = \frac{W_1 - W_0}{W_1 - W_2} \times 100 \quad (4.7)$$

$A_b$ : Ağırlıkça su emme yüzdesi,

$A_h$ : Hacimce su emme yüzdesi,

$W_0$ : Kuru numune kütlesi (g),

$W_1$ : Doygunlaştırılmış numune kütlesi (g),

$W_2$ : Su içerisine batırılmış numune kütlesi (g),

$W_1 - W_0$ : Açık gözeneklerin hacmi (g),

$W_1 - W_2$ : Görünür hacim (g).

#### 4.4.3.3 Birim hacim ağırlık deneyi (görünür yoğunluk)

Bir cismin birim hacim ağırlığı, kuru numune kütlelerinin görünür hacmine oranı şeklinde ifade edilmektedir. Görünür hacim ise numunenin boşluklarının da dâhil olduğu dış yüzeyiyle sınırlı hacmidir (TS EN 1936, 2010). Şekilleri düzgün olmayan cisimlerde birim hacim ağırlığı su emme deneyinden yararlanılarak yapılabilmektedir (TS EN 1015-10, 2001).

$$\Delta = \frac{W_0}{W_1 - W_2} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (4.8)$$

$\Delta$ : Birim hacim kütlesi,

$W_0$ : Kuru numune kütlesi (g),

$W_1$ : Doygunlaştırılmış numune kütlesi (g),

$W_2$ : Su içerisine batırılmış numune kütlesi (g),

$W_1 - W_2$ : Görünür hacim (cm<sup>3</sup>).



#### 4.4.3.4 Açık gözeneklilik

Açık gözeneklilik (%), numunenin açık gözeneklerinin hacminin görünür hacme oranı şeklinde ifade edilmektedir (TS EN 1936, 2010). Çevresel faktörlerden dolayı tarihi yapılarda ortaya çıkan bozulma reaksiyonları, harcın yüzey alanı ve malzemenin gözenekliliği ile yakından ilgilidir. Bu nedenle, gözenekliliğin belirlenmesi, malzemenin karakter özelliği için önemli veriler sağlamaktadır (Güleç & Tulun, 1997).

Açık gözeneklilik şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$p_0 = \frac{W_1 - W_0}{W_1 - W_2} \quad (4.9)$$

$W_1 - W_0$ : Açık gözeneklerin hacmi (g),

$W_1 - W_2$ : Görünür hacim (g).

#### 4.4.3.5 Özgül ağırlık deneyi (gerçek yoğunluk)

Bu deneyi için Bölüm 4.2.1.1’de anlatılan piknometre prensibi uygulanmaktadır. Buna göre gerçek yoğunluk öğütülerek toz (pülverize) hale getirilmiş kuru numune kütlelerinin ( $W_0$ ), bu kütle tarafından yeri değiştirilen sıvı hacmine oranı şeklinde aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir (TS EN 1936, 2010):

$$\delta = \frac{W_0}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (4.10)$$

$V$ = Kütle tarafından yeri değiştirilen sıvı hacmi,

$\delta$  = Özgül ağırlık.

#### 4.4.3.6 Buhar geçirgenlik deneyi

Havanın su buharı özgeçirgenliğinin, malzemenin su buharı özgeçirgenliğine oranına “buhar difüzyon direnç faktörü” denilmektedir. Diğer bir deyişle, bu faktör malzemenin su buharı direncinin aynı sıcaklıkta ve aynı kalınlıktaki durgun bir hava tabakasına nazaran büyüklüğünü ifade etmektedir (TS EN 12086, 2002).

Numunelerin buhar difüzyon direnç katsayısını belirlemek için, gerekli deney düzeneği oluşturulmalıdır. Bunun için, su veya su buharı geçirmeyecek deney kabının içerisine en az 15mm olmak üzere bir kurutucu veya sulu doymuş tuz

çözeltisi konulur. Kabın kurutucu veya tuz çözeltilerinden etkilenmemesi için korozyona karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Daha sonra deney kabının ağzı deney numunesi ile sıkıca kapatılır ve deney şartlarından etkilenmeyen bir sızdırmazlık malzemesi ile tespit edilir. Deney numunesi ile kurutucu arasındaki hava boşluğu  $15\pm 5$  mm olmalıdır (TS EN 12086, 2002).

Oluşturulan deney düzeneği sıcaklık ve nemi kontrol edilebilen bir deney hücresine yerleştirilir. Deney düzeneği ile deney hücresi arasındaki kısmi su buharı basınç farklarından dolayı, su buharı deney numunesinden geçmeye başlar. Daha sonra deney düzenekleri, su buharı geçirgenlik hızı sabit hale gelinceye kadar, 24 saatten az olmayan aralıklarla periyodik olarak tartılır (TS EN 12086, 2002).

Bu bilgiler doğrultusunda, buhar geçirgenlik deneyinde, önceden hazırlanmış çapı 7 cm, kalınlığı 1,5 cm olan dairesel harç numuneleri, içerisinde strafor ve  $\text{CaCl}_2$  bulunan plastik bardakların üzerine yerleştirilmiş ve etrafı parafinle tespit edilmiştir (Şekil 4.8). Numuneler desikatöre koyularak her gün aynı saatte bir hafta boyunca ağırlık ölçümleri yapılmış, bulunan değerlere göre, belirtilen formüller sonucunda numunelerin buhar difüzyon direnç katsayılarına ulaşılmıştır.



**Şekil 4.8** : Buhar geçirgenlik deney numuneleri.

Ölçümler Mettler marka, 3000/0,01g hassasiyetteki elektronik terazi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.9). Desikatör içindeki nem ve sıcaklık değerlerini belirlemek amacıyla termohigrometre ile sürekli ölçüm yapılmıştır.



**Şekil 4.9 :** Mettler H20 marka elektronik terazi.

$$\mu = \frac{1}{d_{ort}} (\delta_h \times A \times \frac{P_a}{G} - d_H) \quad (4.11)$$

$$\delta_h = \frac{0,083}{R_B \cdot T} \times \left( \frac{P_0}{P} \right) \times \left( \frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad (4.12)$$

$$G = \frac{Fort}{Geçen süre (saat)} \quad (4.13)$$

$d_{ort}$  (m) : numune kalınlığı

$\delta_h$  (kg/msaatPa) : havanın su buharı difüzyon direnci

$A$  (m<sup>2</sup>) : su buharının geçtiği numune alanı

$P_a$  : su buharı basıncı

$G$  (kg/sa) : örnekten geçen su miktarı

$d_H$  (m) : numune altında kalan havanın kalınlığı

$\psi$  (%) : nem miktarı

$R_B$  : su buharı gaz sabiti

$T$  (°K) : kelvin cinsinden hava sıcaklığı

$P_0$  (mmHg) : normal atmosfer basıncı

P (mmHg) : ortam hava basıncı

F<sub>ort</sub> (kg) : numunelerin iki ölçüm arası ağırlık farkları

μ : buhar difüzyon direnç faktörü

**Çizelge 4.8** : Sıcaklığa ve neme bağlı doymun su buharı ve basınç değerleri.

t <sub>dış</sub> (°C)	ψ	P (Pa)	δ <sub>h</sub>
23	94%	2808,4	7,026321E-07

#### 4.4.4 Mekanik deneyler

28, 60, 90 günlük 4x4x16 cm prizmatik harç numuneleri üzerinde TS EN 196-1'e göre eğilme ve basınç deneyleri yapılmış, sonuçlar grafiklere aktarılarak değerlendirilmiştir. Her karışım için 3 adet numune kullanılmış, sonuçların ortalaması alınmıştır.

##### 4.4.4.1 Eğilme ve basınç dayanım deneyleri

Eğilme deneyinde, 4x4x16 cm boyutlarındaki prizma şekilli numune, deney cihazına yan yüzeylerinden biri mesnet silindirleri üzerine gelecek şekilde, boyuna eksenine mesnet silindirlerine dik olarak yerleştirilir. Mesnetlere oturmayan diğer yan yüzeye 50 ± 10 N/s sabit hızla, numune kırılıncaya kadar yük uygulanır (TS EN 196-1, 2009).

Eğilme dayanımından sonra iki parçaya ayrılan numunelerin her biri basınç dayanım testine tabi tutulur.

Eğilme dayanımı (R<sub>f</sub>) megapaskal biriminde aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmaktadır **(4.14)** (TS EN 196-1, 2009).

$$R_f = (1,5 \times F_f \times I) / b^3 \quad (4.14)$$

R<sub>f</sub> : eğilme dayanımı (MPa),

b : prizma şekilli numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu (mm),

F<sub>f</sub> : prizma şekilli numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük (N),

I : mesnet silindirleri arasındaki mesafe (mm).

Basınç dayanımı deneyinde numune parçaları boyuna yönde yükleme plakaları arasına yatay konumda yerleştirilir. Malzemenin bu plakalardan çıkıntısı 10 mm

aşmamalıdır. Yük, tüm deney boyunca  $2400 \pm 200$  N/s sabit hızla uygulanır. Yükleme hızının elle uygulandığı durumlarda, kırılma anına yaklaşıldığında hız düşürülmelidir. Basınç dayanımı ( $R_c$ ), megapaskal biriminde aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmaktadır (4.15) (TS EN 196-1, 2009):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (4.15)$$

$R_c$  : Basınç dayanımı (MPa),

$F_c$  : Kırılmadaki en büyük yük (N),

1600 : Yükleme plakaların veya uzatma plakalarının alanı (40 mm x 40 mm) ( $\text{mm}^2$ ).

Standardın belirttiği şekilde, eğilme ve basınç deneyleri 28, 60 ve 90 günlük ve 7 gün etüvde bekletilen 28 günlük 4x4x16 cm prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Boyutları ölçülen örneklerde önce eğilme dayanımı testi yapılmış, daha sonra basınç dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Her karışımdan 3 er adet numune kullanılmış, sonuçların ortalaması alınmıştır. Deneyler MFL marka 100KN'lık Universal deney aletinde yapılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 : Eğilme ve basınç deney düzeneği.

## 4.4.5 Kimyasal deneyler

### 4.4.5.1 Asit kaybı analizi

Kimyasal analiz, tarihi yapıların restorasyon, onarım ve koruma çalışmalarında orijinal malzemenin karakteristik özelliklerinin doğru bir şekilde saptanmasında ve yerine geçecek en uygun malzemenin belirlenmesinde önem taşımaktadır. Bu amaçla harcın temel bileşenleri olan bağlayıcının seyreltilmiş asit yardımıyla agregadan ayrılması ve bağlayıcı agrega oranlarının hesap edilmesi için asit kaybı analizi uygulanmaktadır (RILEM, 2005).

Asit kaybı analizinde, kullanılacak olan asidin cinsi ve konsantrasyonu ile ilgili uluslararası bir standart bulunmamaktadır. Farklı ülkelerdeki farklı laboratuvarlar, edinilmiş pratiklere göre farklı tip asitler kullanmaktadırlar. Ancak İtalya'da yürütülen deneysel bir programda, yıllar içinde aynı harç numunesi üzerinde aynı sıcaklıkta, aynı tip asit, aynı konsantrasyonda ve aynı sürede kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirine çok yakındır (RILEM, 2005).

Diğer yandan, uygulanan kimyasal analizler sonrasında bile sonuçları yorumlamakta sıkıntılar ortaya çıkmaktadır. Harcın ana bileşenleri olan agrega ve bağlayıcının birbirinden kolayca ayrılmaması sonucu, bağlayıcı agrega oranını en doğru şekilde tespit etmek zorlaşmaktadır. Bu durum agreganın tamamen veya kısmen asitte çözünen maddeler içermesi ile ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, en doğru veriyi elde etmek için kimyasal analizlerden önce mikro-yapı analizlerinin yapılması tavsiye edilmektedir. Örneğin harç numunesi bileşen olarak asitte çözünebilir silika ihtiva edebilmektedir. Bu durum yapılan kimyasal analizlerle tespit edildiğinde, doğrudan kirecin hidrolik karakterde olduğu bilgisi çıkarılmamalıdır. Sonuçların güvenilirliği için mikro-yapı analizlerine başvurulmalıdır (RILEM, 2005; ASTM C1324-10, 2010).

#### *a) Agregası asitte çözünmeyen kireç harçları:*

Tarihi harcın asit kaybı analizine başlamadan önce belirlenmesi gereken en önemli bilgi agreganın hidroklorik asitte çözünmeyecek yapıda olmasıdır. Bu bilginin elde edilmesi için XRD analiz ve mineralojik-petrografik analiz kullanılabilir. Eğer, XRD analizleri veya diğer analizler sonucunda harcın içinde tuz varlığı tespit edilirse (tuz, orijinal agreganın, orijinal bağlayıcının veya karıştırma ve uygulama işlemi

sonrasında harcın içinde bulunabilir), sonuçların doğruluğu için bu maddelerin içeriği ve oranı da belirlenmelidir (RILEM, 2005).

Deneyin yapılışında; hazırlanmış 10 gr harç numunesi 400 ml deney kabının içersine konur. Üzerine 200 ml damıtılmış su eklenir ve topaklanmanın önlenmesi için karıştırılır. Karışım 30 ml HCl (1N) eklenir ve 60 dk boyunca sürekli olarak karıştırılmaya devam edilir. Karışımın sıcaklığını 20-23°C arasında tutmak önemlidir. Asitle reaksiyon sonucunda karışım filtreden geçirilir. Numunenin asitten zarar görmesini engellemek için, filtreleme süresi 15 dakikayı geçmemelidir. Asitte çözünmeyen tortu kısmı 4 defa damıtılmış su ile yıkanır ve deney kabından filtreye aktarılır. Filtreye aktardıktan ve iyice yıkandıktan sonra, filtredeki tortu kısım kurumaya bırakılır ve agrega miktarının ağırlığı ölçülür. Filtrelemeden sonra karışımın içindeki magnezyum ve kalsiyum içeriği de AAS yöntemi (atomic absorption spectrometer) veya başka ıslak kimyasal analizlerin yapılması ile belirlenebilir (RILEM, 2005; ASTM C1324-10, 2010).

*b) Agregası asitte tamamen veya kısmen çözünen kireç harçları:*

Harcı oluşturan agreganın kısmen veya tamamen kalker içerikli olması durumunda, harcı oluşturan bağlayıcının, agreganın ve diğer bileşenlerin kompozisyonlarının belirlenebilmesi ancak ince katmanlarla yapılan petrografik veya X-ray kırılma analizleri ile mümkün olmaktadır. Agregası asitte çözülebilir olduğu zaman, bağlayıcı agregası oranını belirlemede asit kaybı analizi doğru sonuçlar vermeyecektir (RILEM, 2005).

Kalkerli agregayı ve bağlayıcıyı ayırmanın diğer bir yolu da mekanik ayırma yöntemini kullanmaktır. 10-15 g numune hazırlanır yavaşça ezilerek harcın parçalanması sağlanır. Daha sonra 40°C de sabit kütleye ulaşmaya kadar kurutulan numune desikatörde bekletilerek soğutulur ve 63µm lik elekten elenir. Elekten geçen parçalar bağlayıcı açısından zengin, elek üzerinde kalan parçalar ise agregası açısından zengin kısmı oluşturmaktadır. Bu ayırma işleminden sonra, mutlaka mikroskop ile sonucun görsel değerlendirmesini yapmak gerekmektedir (RILEM, 2005).

*c) Hidrolik bağlayıcı harçlar:*

Harç, hidrolik bağlayıcılar ve asitte çözünmeyen agregası içeriyorsa, numune daha önceki bölümlerde anlatıldığı şekliyle hazırlanmalıdır ve agreganın kalker içerikli olup olmadığına dikkat edilmelidir.

*Asit kaybı analizi sonrasında harçtaki çözünmeyen kısmın belirlenmesi:*

Agregası asitte çözünmeyen harçlar için gerekli olan işlemler uygulandıktan sonra, aside maruz kalan ancak çözünmeyen kısım iyice yıkanır ve deney kabından filtreye aktarılır. Çözünmeyen kısmın içeriği harçtaki silisli agreganın yüzdesini vermektedir.

Filtre edilmiş çözeltideki çözünebilir silika, sülfatlar ve çözünebilir tuz ise farklı kimyasal analizlerle ve gravimetry, colorimetry, turbidimetry, UV/VIS, AAS yöntemleri ile belirlenebilmektedir (RILEM, 2005).

*Asit kaybı analizi sonrasında asitte çözünen bileşenlerin belirlenmesi:*

Çözünmeyen kısım kurutulur ve ağırlığı ölçülür. Harçtaki çözünebilir kısım ise çözünmeyen kurutulmuş kısmın sodyum karbonat çözeltisi içerisinde kaynatılması ile tespit edilebilir. Ancak bu şekilde elde edilen sonuç güvenilir değildir. Çözünebilir silikanın varlığı analiz sonucunu etkileyebilir. Bu nedenle çözünebilir madde varlığını, çözünebilir silikanın belirlenmesinden sonra hesaplamak daha doğru sonuç sağlamaktadır (RILEM, 2005).

Farklı yörelerde, bağlayıcının, agreganın hatta harcın içindeki görevi tam olarak bilinmeyen materyallerin bile farklı varyasyonları bulunmaktadır. Bu nedenle kimyasal analiz yoluyla bağlayıcının ve agreganın karışım oranlarının belirlenmesinden önce, kullanılan yerel malzeme tipleri ve özellikleri hakkında veriye sahip olmak en doğru sonucu elde etmek açısından önem taşımaktadır (RILEM, 2005).

#### **4.4.5.2 Asit kaybı sonrası elek analizi**

Asit kaybı analizinden sonra asitle reaksiyona girmeyen agregalar büyükten küçüğe doğru üst üste dizilmiş 16, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.250, 0.125, 0.063 mm eleklerden elenerek, her aşamadan sonra elek üzerinde kalan kısım tartılmakta ve ağırlığı belirlenmektedir. Bu şekilde örneklerin içerdiği silisli agregaların ve hem dolgu hem de katkı maddesi olarak kullanılan puzolanik maddelerin tane boyut dağılımları ve incelik modülleri hakkında bilgi edinilebilmektedir. Elek analizi sonrasında, elekten geçen malzeme yüzdelere göre örneklerin granülometrik eğrileri çizilir (Güleç, 1992; RILEM, 2005).



#### 4.4.5.3 Kızdırma kaybı analizi

Kızdırma kaybı analizi, harcın hidrolik özelliğini tespit etmek amacıyla, harç içerisindeki karbonat, su ve alçı gibi maddelerin oranlarının belirlenmesi yoluyla yapılır. Bu oranlar harç numunesinin 110°C, 550°C ve 950°C de, etüvde ve kül fırınında kızdırılması sonucu, harcın bünyesindeki bileşenlerin farklı sıcaklıklarda ki kütle kayıpları ile hesaplanmaktadır.

Bu analizin yapılışı, Amerikan standart organizasyonu tarafından şu şekilde belirlenmiştir. 1g numune (W) 110°C de en az 30 dakika kurutulur, desikatörde oda sıcaklığına getirilir ve ağırlığı hesaplanır (W<sub>1</sub>). Bu sıcaklıktaki ağırlık kaybı malzemedeki serbest nem miktarını vermektedir (ASTM C1324-10, 2010; Güleç, 1992).

110°C deki ağırlık kaybı;

$$\% \text{ Nem (110°C)} = \frac{W - W_1}{W} \times 100 \quad (4.16)$$

W= Örneğin ilk ağırlığı

W<sub>1</sub>= Örneğin 110°C deki ağırlığı.

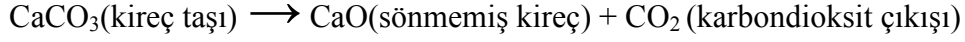
Daha sonra numune 550°C deki kül fırınına yerleştirilir ve 15 dakika süresince fırında tutulur. Fırından çıktıktan sonra desikatörde soğutularak tartılır ve ağırlığı belirlenir (W<sub>2</sub>). 110°C ile 550°C arasında ki ağırlık kaybı bileşenlerin ara yüzündeki molekül suyudur (ASTM C1324-10, 2010).

550°C deki kızdırma kaybı;

$$\% \text{ Kızdırma Kaybı (550°C)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (4.17)$$

W<sub>2</sub>= Örneğin 550°C deki ağırlığı.

Karbonatlaşmış kirecin kalsinasyon sıcaklığı %100 CO<sub>2</sub> ortamında ve 760 mm civa basıncında 900°C'dir (Boynton, 1980). Bu nedenle, son olarak numune 950°C de 15 dakika kızdırılır ve tekrar desikatörde soğutularak tartılır. 550°C-950°C arasında ki ağırlık kaybı karbonatlaşmış kirecin (CaCO<sub>3</sub>) CO<sub>2</sub> gazı çıkışı ile meydana gelen kayıptır (ASTM C1324-10, 2010). Kalsinasyon sıcaklığı, ortamda CO<sub>2</sub> derişiminin azalması ile birlikte düşmektedir (Boynton, 1980).



950°C deki kızdırma kaybı;

$$\% \text{ Kızdırma Kaybı (950°C)} = \frac{W_2 - W_3}{W_1} \times 100 \quad (4.18)$$

$W_3$  = Örneğin 950°C deki ağırlığı.

Yapılan analizler göre, puzolanik harçlarda bulunan bağlayıcı malzeme, kirecin karbonatlaşması sonucu oluşan kalsit kristalleri ve puzolan ile kirecin reaksiyonu sonucu oluşan kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidratlardan oluşmaktadır. Kızdırma kaybı analizi sonrası bulunan sonuçlara göre; 700-900°C'da kalsitte bulunan CO<sub>2</sub> kaybının, 200-600°C'da kalsiyum silika ve alümina hidratlarda bulunan su kaybına oranı 1-10 arasında ise harç hidrolik özellik taşıyor demektir (Bakolas ve diğ, 1998; Moropoulou ve diğ, 2000b).

## **5. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Horasan harçlarının karakter özelliklerini test edebilmek amacıyla, hazırlanan numuneler üzerinde belirlenen deney akış şemasına göre deneysel çalışmalar uygulanmıştır.

Değişik hammadde kompozisyonları ve malzeme oranlarına göre hazırlanan toplam 9 farklı karışımın her birinden, tüm deneylerde kullanabilmek için 24'er adet harç numunesi üretilmiş ve belirlenen günlerde deneylere tabi tutulmuştur. Bu deneyler sonucunda harçların fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Deney sonuçları tablolara ve grafiklere aktarılarak, harç numunelerinin hammaddelerine ve oranlarına göre değişen değerleri incelenmiştir.

Uygulanılan deneysel çalışmalar, yapılardan alınan tarihi harçların bileşen cinsi ve miktarının tespitinde uygulanan çalışmalardır. Bu nedenle, oranlarında ve hammadde kompozisyonlarında değişiklik yaparak bizim belirlediğimiz harç karışımları üzerinde aynı deneysel çalışmaları uygulamak, farklı bileşen ve orandaki harç numunelerinin yapısal özellikleri arasında bir karşılaştırma yapma aynı zamanda deneysel metodolojiyi de test etme imkânı sağlamaktadır.

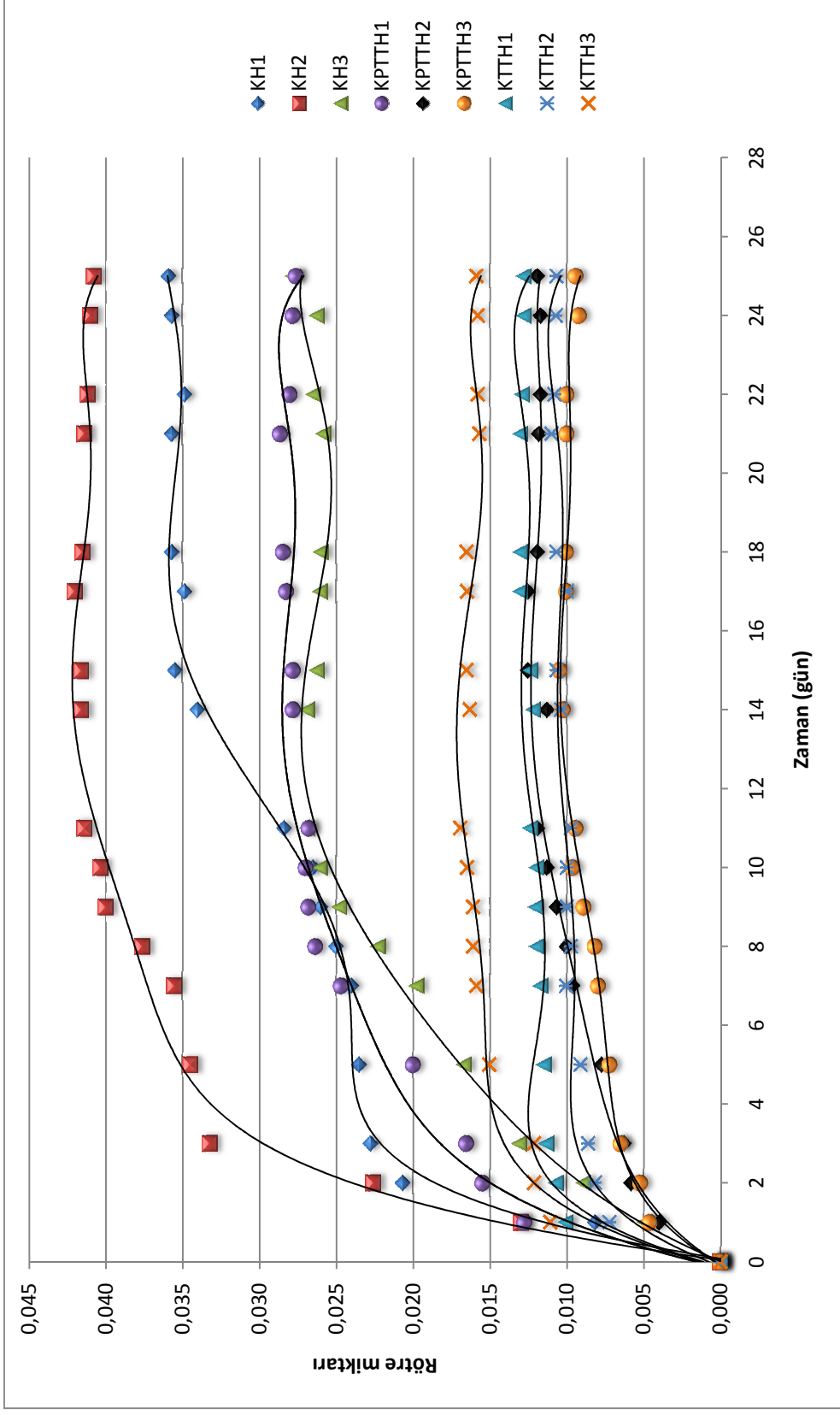
### **5.1 Rötire Deneyinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Rötire deneylerinin toplu sonuç grafiği Şekil 5.1'de verilmektedir.

Grafiğe göre, en fazla rötire seri 1 deki KH2 numunesinde görülürken, en az rötire miktarı olan numune seri 2 deki KPTTH3'dür. Rötire miktarındaki artışın en hızlı olduğu numune ise seri 1 deki KH1 numunesidir.

Seri 1'i oluşturan ve agrega olarak tuğla kırığı ile dere kumu, bağlayıcı olarak da saf kireç içeren KH1, KH2 ve KH3 numunelerinin rötire miktarlarında zamana bağlı sürekli bir artış görülmektedir. Rötire farkı da diğer numunelere göre daha fazladır.

İçerik olarak öğütülmüş puzolan ilave edilen seri 2 ve seri 3'de zamana bağlı olarak rötire değerleri benzer bir artış göstermektedir.



Şekil 5.1 : Rötre deneyi toplu sonuçları.

Seri 2’de, seri 1 deki kireç miktarının %20’si yerine ponza taşı tozu ilave edilmesi ile oluşan KPTTH1, KPTTH2 ve KPTTH3 harçlarının rötre miktarlarının azaldığı görülmektedir. Sadece KPTTH1 numunesinde rötre miktarı seri 2 deki diğer numunelere göre daha fazladır.

Seri 3’de kireç miktarının %20’si yerine tuğla tozu ilave edilmesi ile KTTH1, KTTH2 ve KTTH3 harçlarının rötre miktarlarında da seri 1’e göre düşüş görülmektedir.

Bütün numunelerde rötre artış hızları ilk 5 gün içerisinde çok fazla iken, özellikle 16. günden sonra rötre artış miktarlarında bir değişiklik olmadığı görülmektedir.

## **5.2 Ultrases Deneyi ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Oranları ve bileşenleri farklı harç numunelerine 28., 60. ve 90. günlerde ultra ses deneyi yapılmış ve çıkan sonuçlar Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Seri 1’de farklı oranlarda hazırlanan KH1, KH2 ve KH3 numuneleri incelendiğinde, tüm numunelerde ultrases hızının, zamana bağlı olarak, yani malzeme kurudukça arttığı görülmektedir. En belirgin artış, 28. günde etüv kurularında olmaktadır. Ayrıca Şekil 5.2’deki günlere göre ultrases hızı değişim grafiğine bakarsak, bağlayıcı/agrega oranı 1:2 olan KH1 numunesinin en yüksek ultrases hızına sahip olduğu görülmektedir. Hızı en düşük olan ise b/a oranı 1:3 olan KH2 numunesidir.

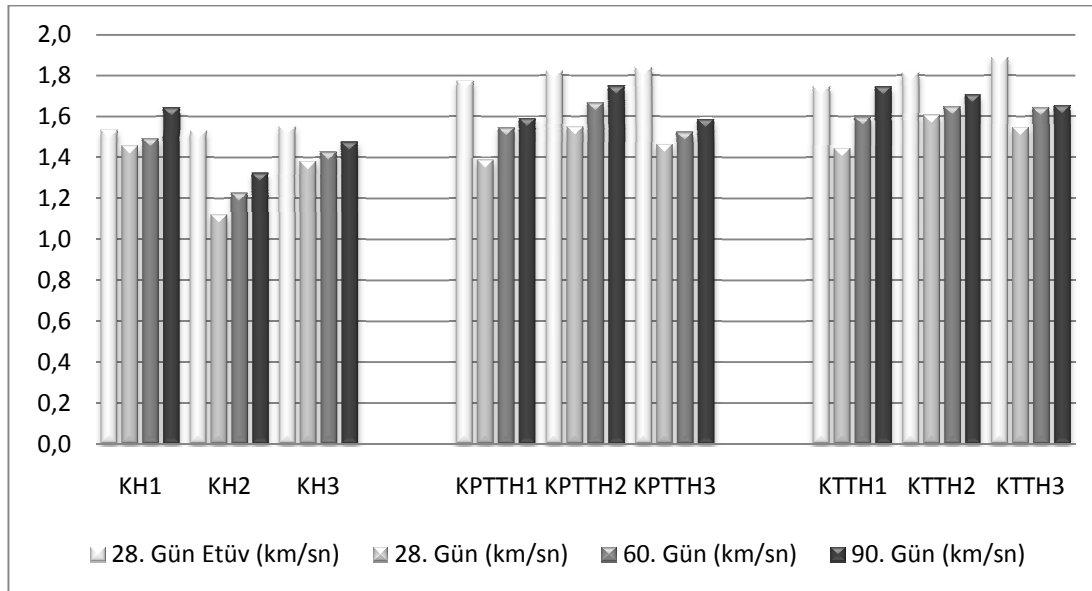
Seri 2’de farklı oranlarda hazırlanan KPTTH1, KPTTH2 ve KPTTH3 numuneleri incelendiğinde, zamana bağlı benzer bir hız artışı görülmektedir. Ancak 28. gün etüv kurusu üzerinde yapılan ölçüme göre ultra ses hızındaki artışı oldukça fazladır. Şekil 5.2’deki grafiğe göre, oran değişimlerine göre hız değişimlerinde çok büyük farklar olmamasına rağmen bağlayıcı/agrega oranı 1:3 olan KPTTH2 numunesindeki hız biraz daha fazladır.

Seri 3’de farklı oranlarda hazırlanan KTTH1, KTTH2 ve KTTH3 numuneleri incelendiğinde de zamana bağlı olarak ultra ses hızında artış görülmektedir. Ayrıca 28. gün etüv kurusu üzerinde yapılan ölçümlerde ultra ses hızındaki artışın fazla olduğu görülmektedir. Şekil 5.2’ye göre oran değişimlerine bağlı olarak ultra ses hızlarında büyük farklar yoktur.

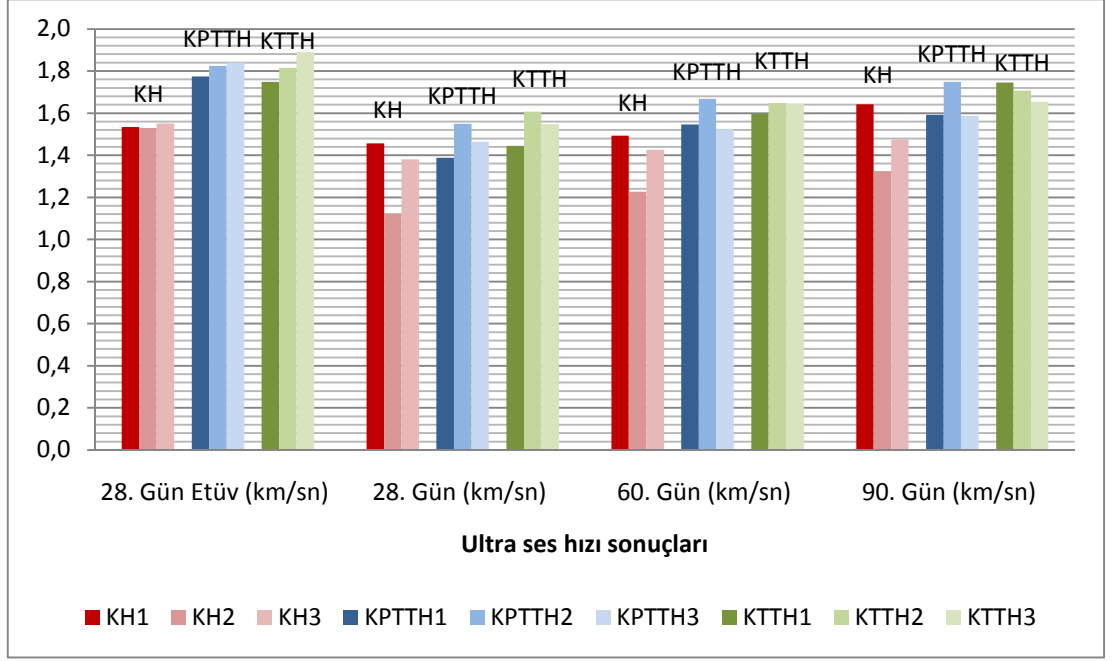
Bu değerler, serilere bağlı olarak incelendiğinde bağlayıcıya ek olarak öğütülmüş puzolan içeren seri 2 ve seri 3 de ultrases hızının, bağlayıcı olarak sadece kireç kullanılan seri 1 e göre daha fazla olduğu görülmektedir. Özellikle değerler arasındaki farklılaşma 28. günde etüv kuruları üzerinde yapılan ölçümlerde ortaya çıkmaktadır. Puzolan içeren seri 2 ve seri 3 ün 28. gün etüv kurusu ultra ses hızı, seri 1 in etüv kurusu ultra ses hızına göre oldukça yüksektir.

**Çizelge 5.1 : Ultra ses hızı deneyi toplu sonuçları.**

	Numune Adı	28. Gün (7 Gün Etüv) (km/sn)	28. Gün (km/sn)	60. Gün (km/sn)	90. Gün (km/sn)
Seri 1	KH1	1,53	1,46	1,49	1,64
	KH2	1,53	1,12	1,23	1,32
	KH3	1,55	1,38	1,43	1,47
Seri 2	KPTTH1	1,77	1,39	1,55	1,59
	KPTTH2	1,82	1,55	1,67	1,75
	KPTTH3	1,84	1,46	1,52	1,59
Seri 3	KTTH1	1,75	1,44	1,60	1,75
	KTTH2	1,82	1,61	1,65	1,71
	KTTH3	1,89	1,55	1,64	1,65



**Şekil 5.2 : Günlere göre ultra ses hızı değişim grafiği.**



**Şekil 5.3** : Numunelere göre ultra ses hızı değişim grafiği.

Cismin yoğunluğu düşük ise ve/veya bünyesinde çatlaklar var ise ses dalgalarının yayılımı ve dolayısıyla ses geçiş hızı küçük olmaktadır. Ses geçiş hızının yüksek olması, boşlukların az dolayısıyla dayanımın yüksek olduğu anlamına gelmektedir (Postacıoğlu, 1981). Dolayısıyla seri 2 ve seri 3 deki numunelerde ses geçiş hızının yüksek olması, dayanım ile ilgili de bilgi vermektedir. Özellikle puzolan katkılı harçların, 105°C de 7 gün bekletilmesi sonucunda ultra ses hızı ve dayanımının hızla arttığı gözlenmektedir.

### 5.3 Fiziksel Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Hazırlanan harç numunelerinin fiziksel özelliklerini belirlemek için TS EN 1925, TS EN 1936, TS EN 13755, TS EN 1015 ve TS EN 12086'ya göre kılcallık, su emme, birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, açık gözeneklilik ve buhar geçirgenliği deneyleri yapılmıştır Yapılan bu deneylerin toplu sonuçları Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

28.günde kılcallık deneyi ve su emme deneyi gerçekleştirilmiş, standartta belirtilen süre boyunca distile su içerisinde bekletilen numunelerin, su dışarısındaki suya doymuş ağırlıkları ve su içerisindeki ağırlıkları ölçülmüştür. Bu deneylerden elde edilen verilere göre numunelerin kılcallık katsayıları, ağırlıkça ve hacimce su emme yüzdeleri, birim hacim ağırlıkları, özgül ağırlıkları ve açık gözeneklilik oranları hesaplanmıştır.

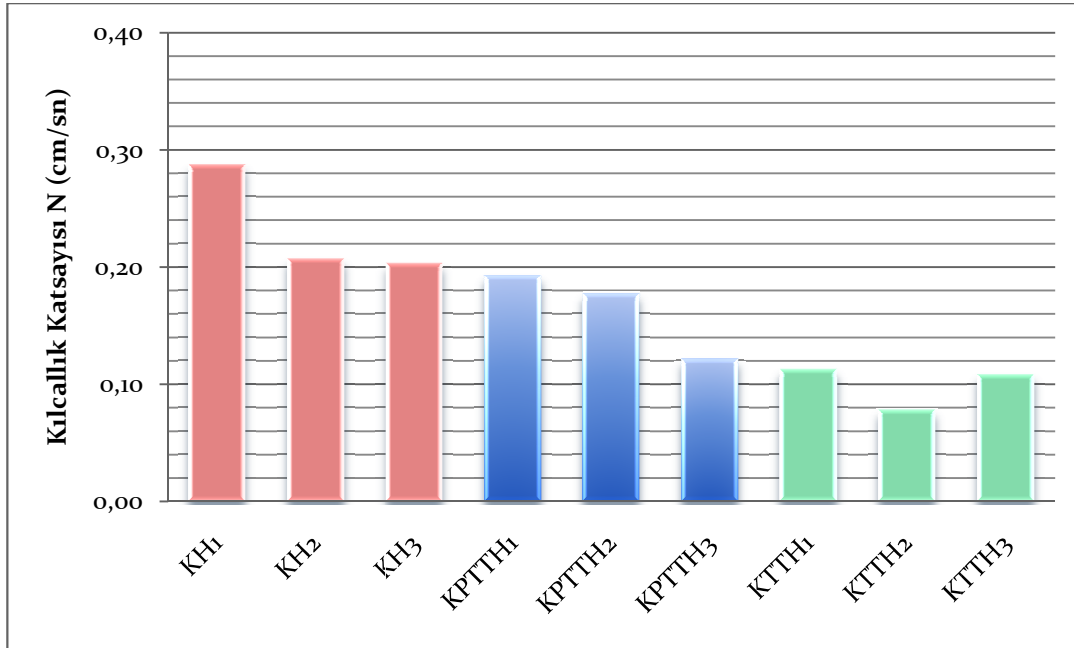
Deney hücresinde bekletilen dairesel harç numuneleri ile hazırlanan deney düzenekleri ise yedi gün boyunca düzenli aralıklarla tartılmış ve buhar difüzyon direnç katsayıları bulunmuştur.

**Çizelge 5.2 :** Fiziksel deneylerin toplu sonuçları.

	Numune Adları	Kılcallık Katsayısı $N_{ort}(cm/sn)$	Ağırlıçça Su Emme $A_b(\%)$	Hacimce Su Emme $A_h(\%)$	Birim Hacim Ağırlık $\Delta(gr/cm^3)$	Özgül Ağırlık $\delta(gr/cm^3)$	Porozite $p(\%)$	Buhar Dif Dir. Katsayısı $(\mu)$
Seri 1	KH1	0,28735	26,8	38,0	1,42	2,46	38,0	18,53
	KH2	0,20726	26,2	37,4	1,43	2,51	37,4	21,02
	KH3	0,20335	23,5	34,9	1,49	2,51	34,9	21,01
Seri 2	KPTTH1	0,19287	23,9	35,3	1,48	2,63	35,3	14,09
	KPTTH2	0,17760	21,7	33,0	1,52	2,54	33,0	15,40
	KPTTH3	0,12161	19,9	30,5	1,53	2,62	30,5	14,43
Seri 3	KTTH1	0,11296	23,6	34,3	1,46	2,55	34,3	14,88
	KTTH2	0,07834	21,9	32,9	1,50	2,47	32,9	15,40
	KTTH3	0,10836	21,9	32,9	1,50	2,48	32,9	12,82

*Kılcallık deneyi sonuçları:*

28. günde yapılan kılcallık deneyi sonucuna göre, sadece kireç, dere kumu ve tuğla kırığı bileşenlerini içeren seri 1 in kılcallık katsayısı değerlerinin seri 2 ve seri 3 e göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 5.4).



**Şekil 5.4 :** Kılcallık katsayısı deney sonuçları.

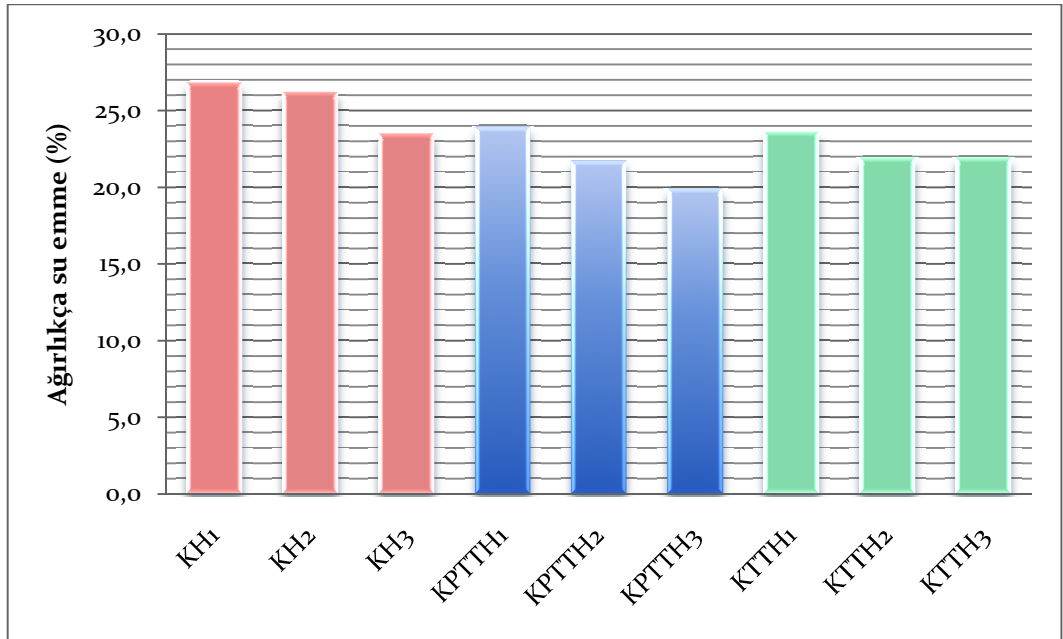


Seri 2 ve seri 3 de karışıma kirecin %20 si yerine ince öğütülmüş puzolan ilave edilmesi malzemedeki boşlukların azalmasına ve oluşan harcın su geçirimsizliğinin azalmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla suyun kapiler boşluklarda yükselme katsayısı düşmektedir. En belirgin düşüş tuğla tozu katılarak hazırlanan seri 3 deki KTTH numunelerinde görülmektedir.

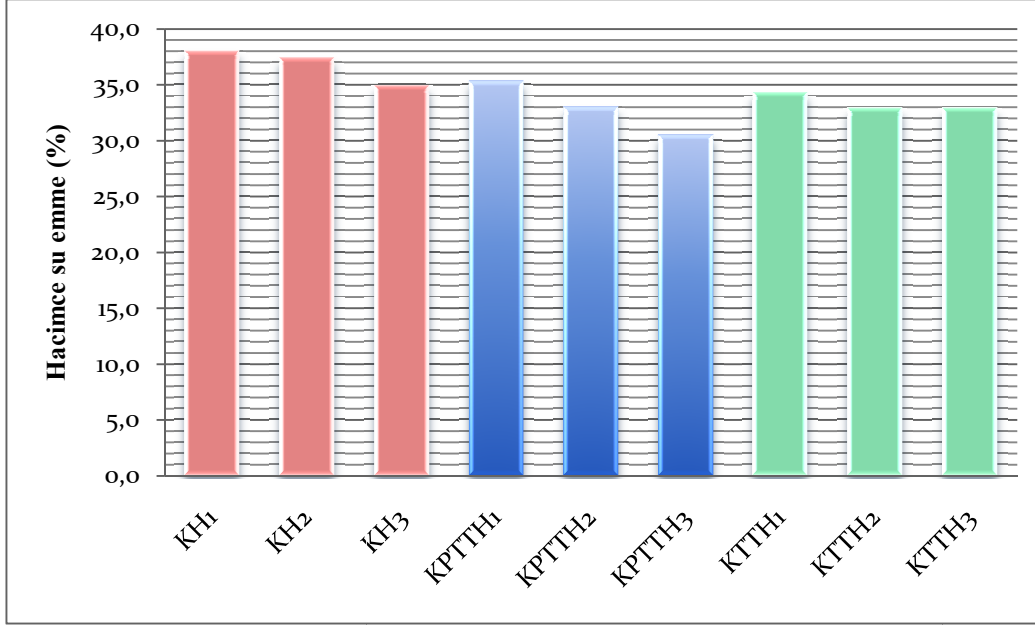
Bazı sapmalar göz önünde bulundurulursa, bağlayıcı/agrega oranlarının azalması sonucunda da kılcallık katsayısı düştüğü söylenebilir.

*Su emme deneyi sonuçları:*

28. günde yapılan su emme deneyi grafik sonuçlarına göre, numunelerin ağırlıkça su emme değerleri %19 ile %27 arasında yer almaktadır. Bu değerler tarihi yapılardan elde edilen sonuçlara yakındır (Ersen ve diğ, 1995). Seri 1 deki KH numunelerinin, ağırlıkça ve hacimce su emme değerlerinin seri 2 ve seri 3 e göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 5.5, Şekil 5.6). Seri 2 ve seri 3 de kirecin % 20 si yerine ince öğütülmüş puzolan eklenmesi sonucunda, numunelerin su emme değerlerinde düşüş görülmektedir. Bununla birlikte seri 2 deki KPTTH ve seri 3 deki KTTH numunelerinin su emme değerleri birbirine çok yakındır. Puzolan olarak seri 2 de ponza taşı tozunun ve seri 3 de tuğla tozu kullanılmasının su emme değerlerinde çok belirgin değişikliklere yol açmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.5 : Ağırlıkça su emme deneyi sonuçları.



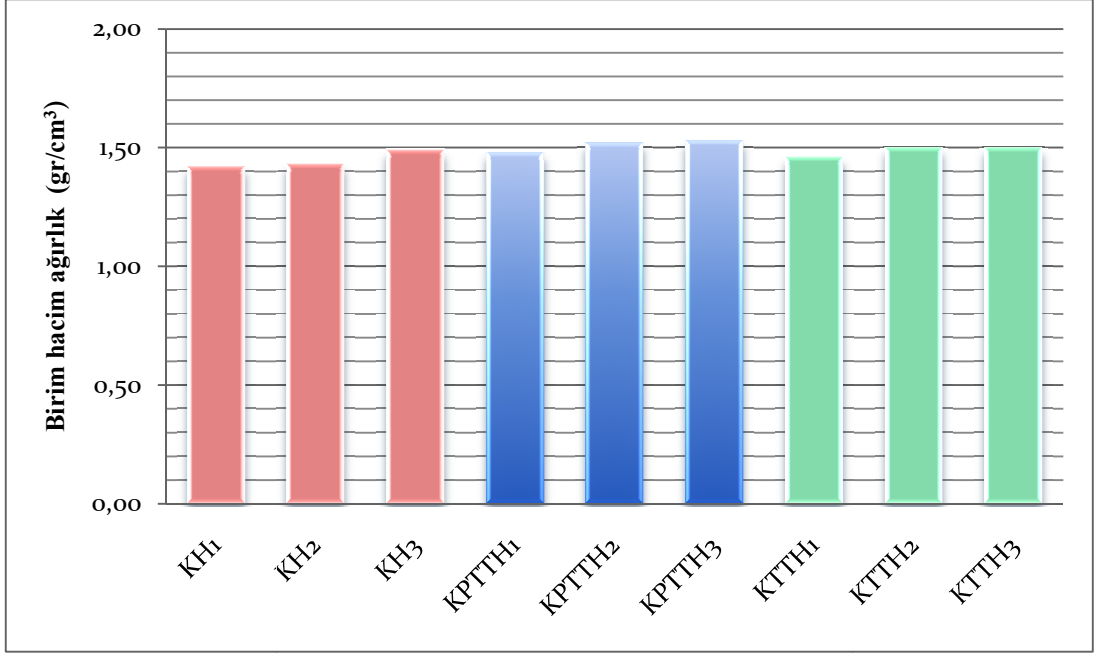
**Şekil 5.6 :** Hacimce su emme deneyi sonuçları.

Ayrıca hazırlanan tüm karışımlarda bağlayıcı/agrega oranının azalmasıyla birlikte su emme oranının azaldığı gözlenmektedir.

*Birim hacim ağırlık deneyi sonuçları:*

28. günde yapılan birim hacim ağırlık deneylerinin grafik sonuçlarına göre bütün numuneler 1,40-1,55 gr/cm<sup>3</sup> arasında düşük birim hacim ağırlık değerlerine sahiptir. Konuyla ilgili yapılan bazı deneysel çalışmalara göre, tarihi yapılardan elde edilen sonuçlarda bu değer 1,20-1,70 g/cm<sup>3</sup> arasında olduğu bilinmektedir (Ersen ve diğ., 1995; Uğurlu, 2005). Seri 2 ve seri 3 de harç içerisine sırasıyla, öğütülmüş ponza taşı tozu ve öğütülmüş tuğla tozu katılması, bu harç numunelerinin birim hacim ağırlıklarını seri 1'deki KH numunelerinin birim hacim ağırlık değerlerine göre bir miktar arttırmıştır (Şekil 5.7). Puzolan olarak ponza taşı tozu katılan seri 2 nin birim hacim ağırlık değerleri ise, puzolan olarak tuğla tozu katılan seri 3 ile hemen hemen aynıdır.

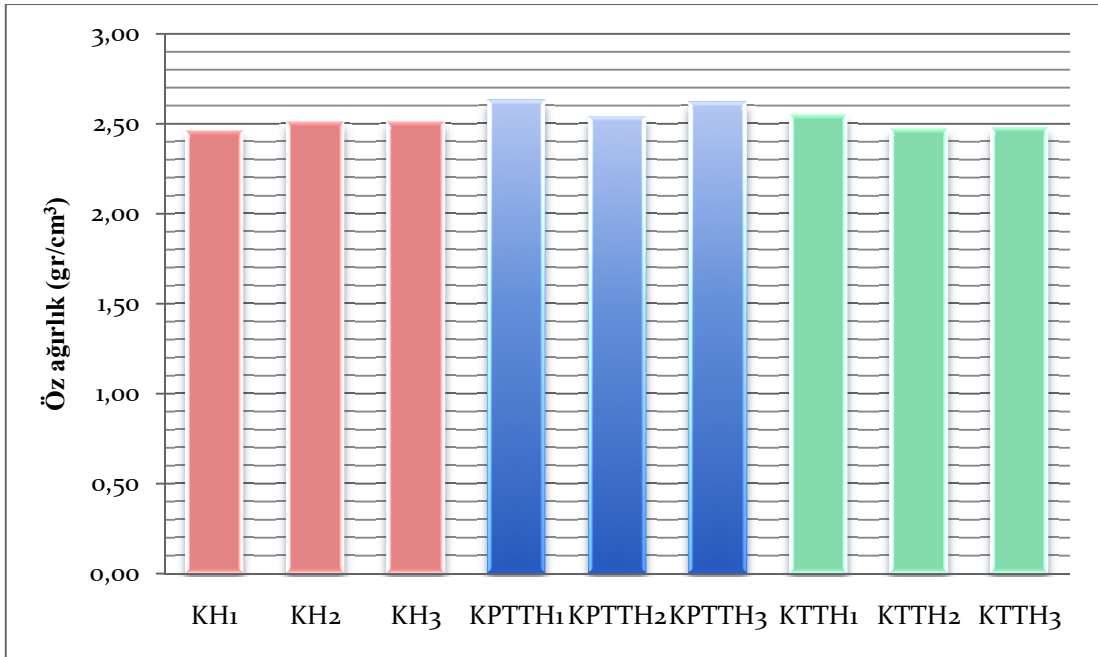
Ayrıca hazırlanan tüm karışımlarda, bağlayıcı/agrega oranının azalmasıyla birlikte birim hacim ağırlık değerlerinin bir miktar artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.7 : Birim hacim ağırlık deneyi sonuçları.

*Özgül ağırlık deneyi sonuçları:*

28. günde yapılan deneyin grafik sonuçlarına göre, bütün numunelerin özgül ağırlık değerleri 2,40-2,65 gr/cm<sup>3</sup> arasında yer almaktadır. Seri 2 ve 3'de karışımlara öğütülmüş puzolanik malzemelerin ilave edilmiş olması özgül ağırlık değerlerini bir miktar arttırmış ancak bağlayıcı/agrega oranlarının farklılaşmasının sonuçlar üzerinde belirgin bir etkisi olmamıştır (Şekil 5.8).

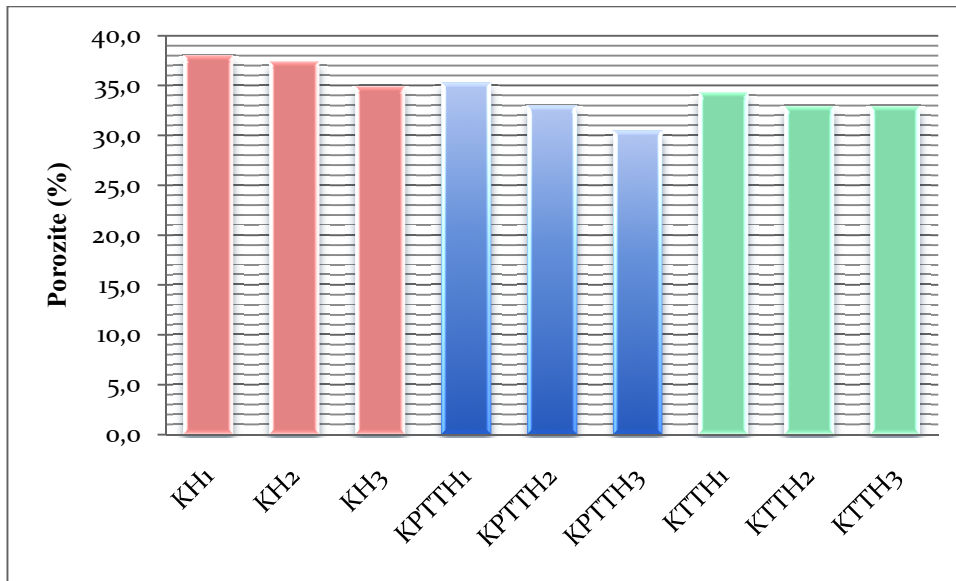


Şekil 5.8 : Özgül ağırlık deney sonuçları.

### Porozite oranı:

Numunelerin boşluk hacminin toplam hacmine bölünmesiyle porozite oranı hesaplanabilmektedir. 28. günde yapılan deneylerin grafik sonuçlarına göre, bütün harç numuneleri %30-40 arasında yüksek gözeneklilik değerlerine sahiptir. Dönem yapılarındaki horasan harçlarının incelenmesi ile ilgili çalışmalardan, bu yüzdenin %30-50 arasında olması gerekliliği tespit edilmiştir. Puzolan katılmayan seri 1 deki KH numunelerinin porozite oranı, öğütülmüş puzolan katılan harçlara göre daha yüksektir. Seri 2 ve seri 3 de karışımlara ince öğütülmüş puzolan katılmasıyla malzemedeki doluluk oranı bir miktar artmakta dolayısıyla boşluk oranı da azalmaktadır (Şekil 5.9). Diğer yandan ponza taşı tozu ile tuğla tozu katılan 28 günlük serilerin porozite oranları arasında belirgin bir fark görülmemektedir.

Bütün karışımlarda bağlayıcı/agrega oranının azalmasıyla birlikte malzemenin porozite yüzdeleri azalmaktadır.

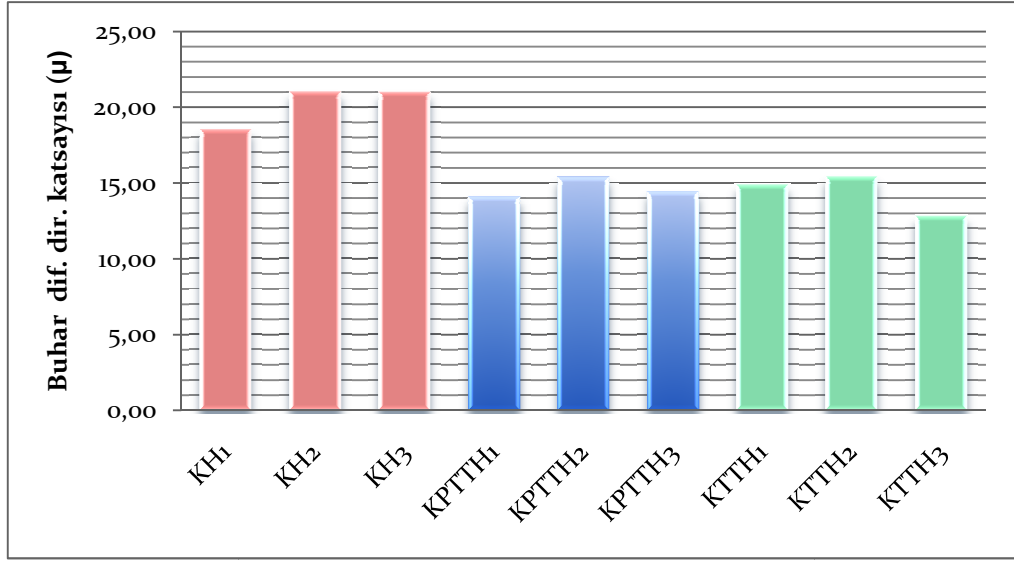


Şekil 5.9 : Porozite oranı.

### Buhar geçirgenlik deney sonuçları:

En yüksek buhar difüzyon direnç katsayısına sahip numuneler seri 1 deki KH numuneleridir. Bu numunelerde bağlayıcı olarak kireç, agrega olarak tuğla kırığı ve dere kumu kullanılmıştır. Seri 2 ve seri 3 deki harçlara, kirecin %20'si yerine öğütülmüş puzolan ilave edilmesi ile birlikte buhar difüzyon direnç katsayısı belirgin

bir şekilde düşmektedir. Öğütülmüş puzolan olarak ponza taşı tozunun ve tuğla tozunun ilave edilmesi ile hazırlanan seri 2 ve seri 3 deki değerler arasında ise belirgin bir fark görülmemektedir.



Şekil 5.10 : Buhar geçirgenlik deney sonuçları.

#### 5.4 Mekanik Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bileşenleri ve karışım oranları farklı, 4x4x16 cm prizmatik harç numuneleri üzerinde 28., 60. ve 90. günlerde eğilme ve basınç deneyleri yapılmış sonuçlar Çizelge 5.3'de verilmiştir.

*Eğilme dayanımı deneyi:*

Eğilme deneyinde, prizmatik numuneler açıklığı 150 mm olan iki mesnet üzerine yerleştirilerek, numunenin tam ortasından P yükü uygulanmıştır.

Şekil 5.11 incelendiği zaman, numunelerin eğilme dayanımlarında zamana bağlı olarak artış görülmektedir.

Seriler arasında karşılaştırma yapıldığında en düşük eğilme dayanımına sahip karışımın, bağlayıcı olarak kireç, agrega olarak dere kumu ve tuğla kırığı içeren seri 1 deki KH numuneleri olduğu görülmektedir. Seri 2 de, bileşen olarak kirecin %20 si azaltılıp yerine ince öğütülmüş ponza taşı tozu katılmasıyla eğilme dayanımında belirgin bir artış olmuştur. Seri 3 de, bileşen olarak ponza yerine öğütülmüş tuğla tozu ilave edilmiş, bu değişiklik de eğilme dayanımının artmasına neden olmuştur.

Dökümden sonraki ilk yedi gün 105°C sıcaklıktaki etüvde bekletilen, daha sonra ortam koşullarına alınan numunelerin, 28 günlük eğilme dayanımı değerleri de Şekil 5.11'de verilmektedir. Buna göre, öğütülmüş puzolan katılan seri 2 (KPTTH) ve seri 3 (KTTH)'ün eğilme dayanımı değerlerinin, katkı maddesi katılmayan seri 1 (KH)'e göre çok daha hızlı arttığı ve yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.

Her serinin 1:3 oranında oluşturulan karışımları üzerinden eğilme dayanımının yüzdesel olarak değişimini kıyaslarsak, 90 gün sonra ponza taşı tozu katılan KPTTH2 numunesinin ve tuğla tozu katılan KTTH2 numunesinin eğilme dayanımları, aynı gün ve koşullarda ölçülen KH2 numunesinin eğilme dayanımına göre sırasıyla %58 ve %43 artış göstermektedir. Etüv kuruları üzerinden aynı kıyaslamayı yaparsak, bu oranlar KPTTH2 için %80, KTTH2 için %54 olmaktadır.

Her serinin kendi içinde, bileşenleri aynı ancak oranları farklı olan karışımlarını incelediğimizde eğilme dayanımlarında dengeli bir değişim görülmemektedir. Horasan harcı gibi uzun vadelerde dayanım kazanan bir harç için, 90 günlük bir periyotta değişen bileşenlere göre elde edilen değerlerde farklılıklar gözlemlenebilse de, değişen oranlar üzerinden kısa vadede kesin yargılarda bulunmak doğru gözükmemektedir.

#### *Basınç dayanımı deneyi:*

Eğilme dayanımı deneyinden sonra ikiye bölünen numunelerin ikisi üzerinde de basınç dayanımı deneyi uygulanmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır.

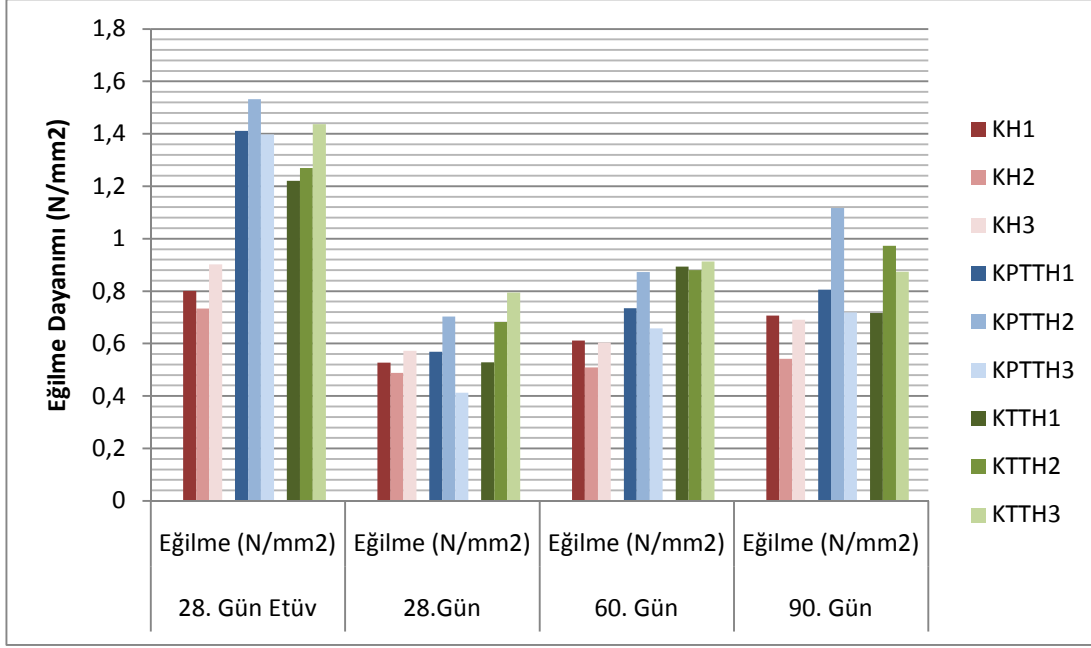
Şekil 5.12 incelendiği zaman, numunelerin basınç dayanımlarında zamana bağlı olarak artış görülmektedir.

Serilere göre inceleme yapıldığında en düşük basınç dayanımına sahip numuneler seri 1 deki KH numuneleridir. Seri 2 ve seri 3 deki numunelerde kirecin %20 si yerine öğütülmüş puzolan katılmasıyla basınç dayanımları yükselmiştir. Özellikle puzolan olarak ponza taşı tozu katılan seri 2 nin basınç dayanımının, tuğla tozu katılan seri 3 e göre daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.

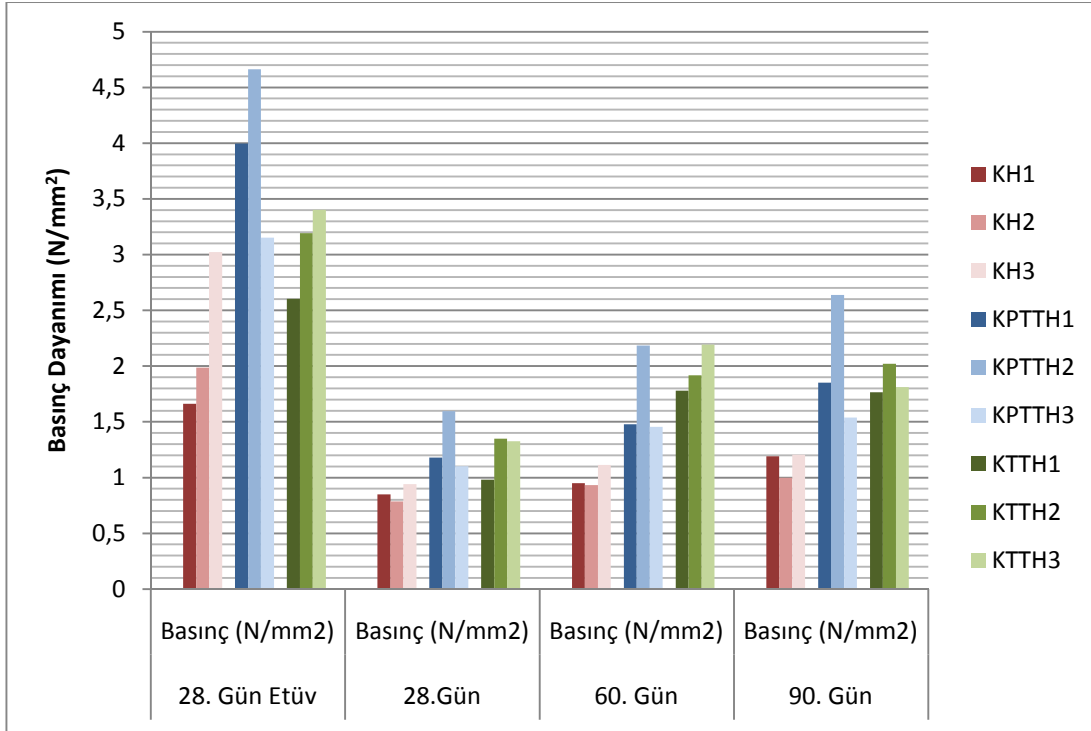
Etüvde bekletilen numunelerin 28 günlük basınç dayanım değerleri oldukça yüksektir. Özellikle öğütülmüş puzolan katılan seri 2 ve seri 3 deki numunelerde basınç dayanımı, katkı maddesi katılmayan seri 1 deki numunelere göre hızlı bir şekilde yükselmektedir. Grafik sonuçlarına göre etüv kurusu numuneler içinde ponza taşı tozu katılan seri 2 en yüksek basınç dayanımına sahiptir.

**Çizelge 5.3 : Eğilme ve basınç dayanımı deneyi toplu sonuçları.**

Seriler	28. Gün (7 Gün Etüv)		28.Gün		60. Gün		90. Gün		
	Eğilme (N/mm <sup>2</sup> )	Basınç (N/mm <sup>2</sup> )	Eğilme (N/mm <sup>2</sup> )	Basınç (N/mm <sup>2</sup> )	Eğilme (N/mm <sup>2</sup> )	Basınç (N/mm <sup>2</sup> )	Eğilme (N/mm <sup>2</sup> )	Basınç (N/mm <sup>2</sup> )	
Seri 1	KH1	0,80	1,66	0,53	0,85	0,61	0,95	0,71	1,19
	KH2	0,73	1,99	0,49	0,79	0,51	0,93	0,54	1,00
	KH3	0,90	3,02	0,57	0,94	0,60	1,11	0,69	1,21
Seri 2	KPTTH1	1,41	4,00	0,57	1,18	0,73	1,48	0,81	1,85
	KPTTH2	1,53	4,66	0,70	1,60	0,87	2,18	1,12	2,64
	KPTTH3	1,40	3,15	0,41	1,10	0,66	1,45	0,72	1,54
Seri 3	KTTH1	1,22	2,60	0,53	0,98	0,89	1,78	0,72	1,76
	KTTH2	1,27	3,19	0,68	1,35	0,88	1,92	0,97	2,02
	KTTH3	1,44	3,40	0,79	1,33	0,91	2,19	0,87	1,81



Şekil 5.11 : Eğilme dayanımı toplu sonuçları.



Şekil 5.12 : Basınç dayanımı toplu sonuçları.

Her serinin 1:3 oranında oluşturulan karışımları üzerinden basınç dayanımının yüzdesel olarak değişimini kıyasladığımız zaman, 90 gün sonra ponza taşı tozu katılan KPTTH2 numunesinin ve tuğla tozu katılan KTTH2 numunesinin basınç dayanımları, aynı gün ve koşullarda ölçülen KH2 numunesinin basınç dayanımına göre sırasıyla %164 ve %102 artış göstermektedir. Etüv kuruları üzerinden aynı



kıyaslamayı yaparsak, bu oranlar KPTTH2 için %267, KTTH2 için %120 olmaktadır. Ponza taşı tozu katılan harcın özellikle etüv kuruları için bu kadar yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşması, ponza taşının tuğla tozuna göre daha iyi puzolanik aktivite gösterdiğini ortaya koymaktadır.

### **5.5 Kimyasal Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Belirli oranlarda ve farklı bileşenler ile hazırlanan harç numunelerinin, kimyasal özelliklerini, bağlayıcı/agrega oranlarını, hidroliklik özelliklerini ve karbonat miktarını tespit etmek amacıyla asit kaybı analizi, kızdırma kaybı analizi ve asit kaybı sonrası kalan agregalara elek analizi uygulanmıştır.

Hazırlanan harçların karışım oranları ve bileşenleri önceden belirlenmiş olduğundan, asit kaybı analizi, elek analizi ve kızdırma kaybı analizinde elde edilen sonuçlar ilk belirlenen değerlerle karşılaştırılmış, uygulanan deneysel yöntem test edilmiştir.

Harcın bileşenlerinin hali hazırda mevcut olması ve ortaya çıkan farklılıkların bu bileşen özelliklerinden kaynaklanabileceği düşüncesiyle, harç bileşenleri üzerinde de asit kaybı deneyleri yapılmış, bileşenlerin asitte kayıp yüzdeleri belirlenmiştir.

Asit kaybı analizinde, deneyler üç farklı miktarda harç numunesi üzerinde gerçekleştirilmiş, miktarın değişmesine bağlı olarak, bağlayıcı/agrega oranlarında meydana gelen değişiklik grafik ve çizelgelerde gösterilmiştir. Ayrıca farklı miktarlar üzerinde elde edilen elek analizi sonuçları da granülometrik eğri grafiğinde belirtilmiştir.

Kızdırma kaybı analizinde ise deneyler iki farklı miktarda harç numunesi ile gerçekleştirilmiş, değişen miktarın analiz sonrası belirlenen sonuçlarda hata payına etkisi gözlemlenmiştir.

#### *Asit kaybı analizi:*

Asit kaybı analizi için 54-85 gr, 38-47 gr ve 9-12 gr arasında olmak üzere üç farklı miktarda harç numunesi alınmış, bunlar etüvde 105°C'ta sabit kütleye gelene kadar kurutulmuştur. Ardından ağırlığı belirlenmiş beherlere konan numuneler, % 15 oranında hazırlanan HCL asit çözeltisi ile reaksiyona sokulmuştur. Örnekler asitli çözeltide 10-20 saat kadar bekletilmiş ardından bekletilen numuneler filtre kâğıdı ile süzlmüştür. Beherde kalan çökelti ise klor iyonu reaksiyonu vermeyinceye kadar

ılık saf su ile yıkandıktan sonra tekrar 105°C'lık etüvde 24 saat kurutulur (Güleç, 1992; RILEM, 2005). Filtrede kalan ince kısım ile beherde kalan agreganın toplamından, harcın silikatlı çözünmeyen kısmı elde edilmiştir. Asitte çözünen bağlayıcı miktarı da, kalan agrega kısmının toplam malzemeden çıkarılması yoluyla bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, kalan malzeme toplamı, asitte kayıp yüzdesi ve bağlayıcı/agrega oranları, Çizelge A.21'de verilmektedir.

Hazırlanan harçlarda bağlayıcı/agrega oranları 1:2, 1:3 ve 1:4 şeklinde belirlenmiştir. Asit kaybı analizi sonrası bulunan sonuçlarda bu oran bir miktar azalmakla birlikte, yine 1:1,5 ile 1:4 aralığında değişmektedir.

Çizelge 5.4'de 54-85 gr arasındaki harç numuneleri ile yapılan analiz sonuçları bulunmaktadır. Bulunan bağlayıcı/agrega oranları, karışımda uygulanan b/a oranları ile uyusmaktadır. Bu oranların değişim grafiği Şekil 5.13'de verilmektedir. Bağlayıcı yüzdesinde meydana gelen artışın nedeninin, karışımda agrega olarak kullanılan tuğla kırığı ve dere kumunun az miktarda asitte çözülebilir madde ihtiva etmesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle harç bileşenleri üzerinde de asit kaybı analizi yapılmış ve asitte çözünen madde yüzdeleri belirlenmiştir (Çizelge 5.7).

Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6'da, daha az miktarda numune ile yapılan analiz sonuçlarında, bağlayıcı/agrega oranları 1:2 ile 1:4 arasında değişim göstermekle beraber, sonuçların hata payının arttığı görülmektedir.

**Çizelge 5.4 : 54-85 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları.**

	Numune Adı	Bağlayıcı (%)	Agrega (%)	B/A	Agrega granülometrik dağılımı (%)					
					4,0	2	1	0,5	0,25	≤0,25
Seri 1	KH1	38,74	61,26	1:1,6	26,46	26,71	15,99	13,35	11,97	5,50
	KH2	32,76	67,24	1:2	20,72	26,63	18,57	14,60	12,21	6,36
	KH3	27,46	72,54	1:2,7	27,21	25,33	17,56	13,53	10,86	5,12
Seri 2	KPTTH1	33,63	66,37	1:2	33,22	21,15	15,70	12,83	10,62	6,30
	KPTTH2	27,30	72,7	1:2,7	20,63	26,06	19,62	14,06	12,10	7,50
	KPTTH3	23,14	76,86	1:3,3	30,45	23,32	12,42	9,98	6,54	6,52
Seri 3	KTTH1	32,13	67,87	1:2	29,00	22,15	17,90	13,67	10,00	6,69
	KTTH2	27,01	72,99	1:2,7	30,63	23,32	17,03	12,77	10,36	5,96
	KTTH3	23,36	76,64	1:3,3	23,88	25,81	19,01	13,60	10,62	6,72

**Çizelge 5.5 :** 38-47 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları.

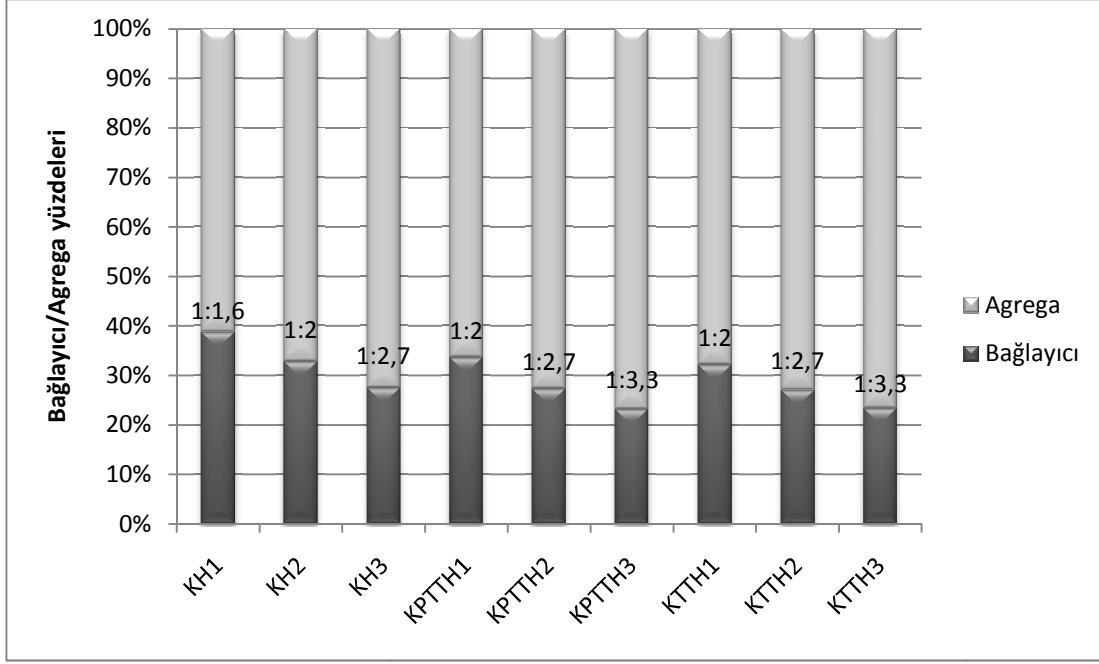
	Numune Adı	Bağlayıcı (%)	Agrega (%)	B/A	Agrega granülometrik dağılımı (%)					
					4,0	2	1	0,5	0,25	≤0,25
Seri 1	KH1	37,16	62,84	1:1,7	31,42	23,23	16,26	13,52	11,76	3,61
	KH2	24,93	75,07	1:3	29,32	24,95	17,47	12,59	11,81	3,94
	KH3	24,70	75,3	1:3	26,47	22,53	15,78	11,37	10,66	3,55
Seri 2	KPTTH1	31,53	68,47	1:2	32,56	24,76	14,95	12,38	9,93	5,06
	KPTTH2	25,80	74,2	1:2,9	26,19	23,57	18,83	14,80	11,51	5,36
	KPTTH3	21,30	78,7	1:3,7	32,55	26,52	16,34	11,82	9,11	3,72
Seri 3	KTTH1	35,10	64,9	1:1,8	27,50	23,40	118,21	14,25	10,84	4,92
	KTTH2	26,56	73,44	1:2,7	37,52	21,50	14,55	11,75	9,96	4,51
	KTTH3	24,65	75,35	1:3,1	24,52	19,06	19,09	14,82	11,40	5,65

**Çizelge 5.6 :** 9-12 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları.

	Numune Adı	Bağlayıcı (%)	Agrega (%)	B/A	Agrega granülometrik dağılımı (%)					
					4,0	2	1	0,5	0,25	≤0,25
Seri 1	KH1	33,53	66,47	1:2	16,17	36,65	17,11	13,91	11,28	4,32
	KH2	24,50	75,5	1:3	13,52	28,62	24,37	14,94	12,42	3,77
	KH3	26,96	73,04	1:2,7	27,56	26,46	19,84	12,28	10,55	2,36
Seri 2	KPTTH1	25,59	74,41	1:2,9	47,75	19,30	11,65	9,48	7,49	2,33
	KPTTH2	30,06	69,94	1:2,3	29,86	27,88	19,24	13,13	9,53	2,34
	KPTTH3	21,85	78,15	1:3,6	52,55	17,56	11,05	6,52	6,66	1,98
Seri 3	KTTH1	23,93	76,07	1:3,1	29,06	25,05	18,55	12,81	8,99	2,49
	KTTH2	19,17	80,83	1:4,2	35,76	25,95	14,24	11,23	9,18	2,85
	KTTH3	15,54	84,46	1:5,4	34,46	21,10	15,05	12,94	8,58	1,27

**Çizelge 5.7 :** Harç bileşenleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları.

Numune Adı	İlk Kütle Kuru (g)	Kalan İnce Malzeme (g)	Kalan Kaba Agregata (g)	Kalan Toplam Malz. (g)	Asitte Kayıp (%)
KUM	48,17	1,86	44,60	46,46	3,55%
KİREÇ	16,14	0,83	0,00	0,83	94,86%
PONZA	25,71	25,39	0,00	25,39	1,24%
TUĞLA	56,03	4,91	49,80	54,71	2,36%

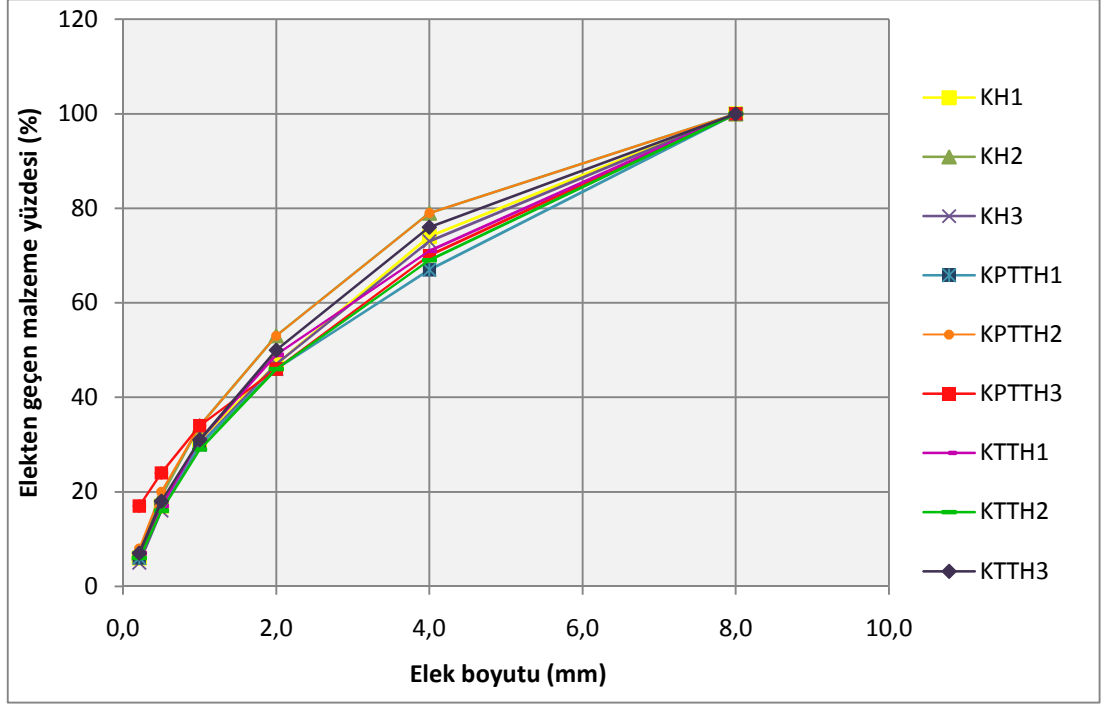


**Şekil 5.13** : 54-85 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analizi sonrası harç numunelerinin bağlayıcı/agrega dağılım yüzdeleri.

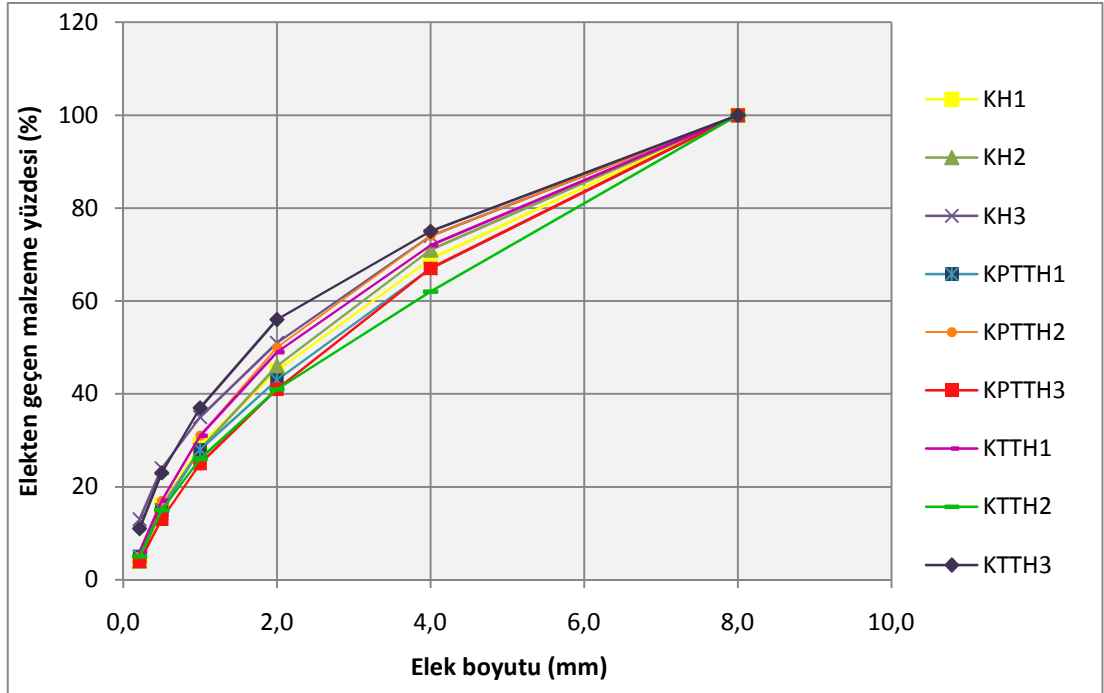
*Asit Kaybı Sonrası Elek Analizi:*

Asit kaybı analizinden sonra, asitte çözünmeyen kısımdan agrega granülometrisini belirlemek için 8, 4, 2, 1, 0.5 ve 0.25 mm lik elekler ile elek analizi yapılmış ve elekten geçen agrega yüzdesi hesaplanarak bulunan değerler Çizelge A.24’de gösterilmiştir. Asit kaybı analizi üç farklı miktar üzerinde gerçekleştirilmiş, bu nedenle üç farklı miktarda çözünmeyen kısım üzerinde elek analizi yapılarak sonuçlar Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da verilmiştir.

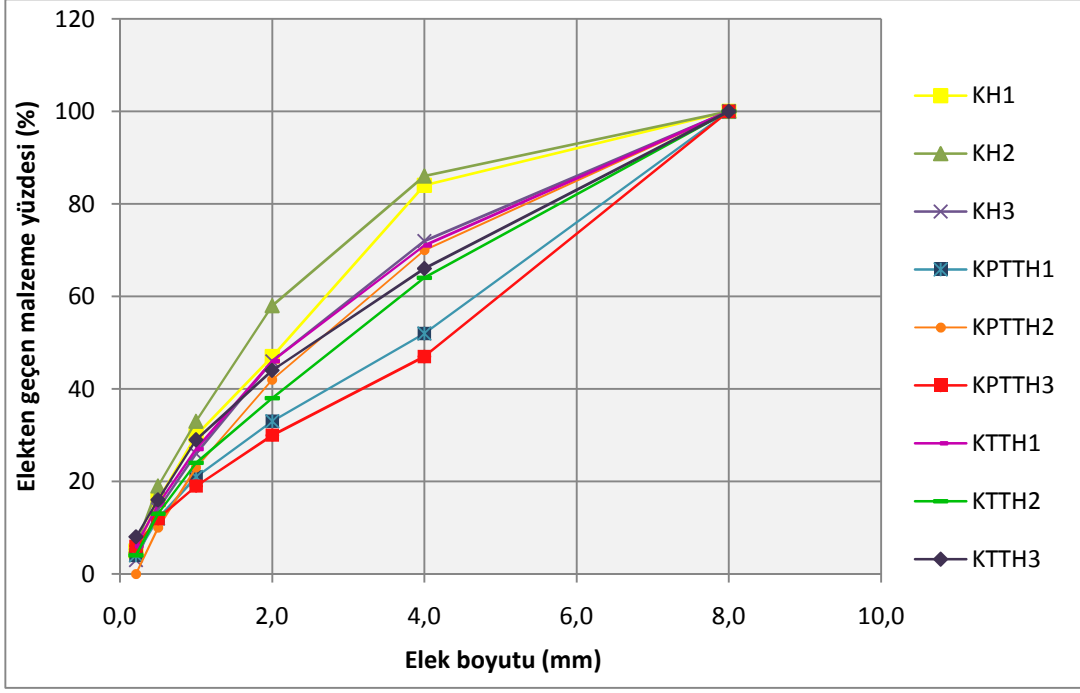
Büyük tane boyutlu agregaların kullanıldığı numunelerde az miktarda numune üzerinde elek analizi yapmak kesin sonuçlar vermemektedir (RILEM, 2005). Bu nedenle, grafik sonuçlarında, analizi yapılacak miktar azaldıkça granülometri eğrisinin de veri aralıklarının arttığı görülmektedir.



Şekil 5.14 : 54-85 g harç agrega granülometri eğrisi.



Şekil 5.15 : 38-47 g harç agrega granülometri eğrisi.



Şekil 5.16 : 9-12 g harç agrega granülometri eğrisi.

*Kızdırma kaybı analizi:*

Hazırlanan karışımlardan 5 ve 10 gr harç numunesi alınmış, numuneler belirlenen sıcaklıklarda kızdırma kaybı analizine tabi tutularak, bu sıcaklıklardaki ağırlık kayıplarından kimyasal su yüzdesi, karbonat miktarları ve hidroliklik özellikleri bulunmuştur. Bulunan değerler Çizelge A.27 ve Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9'da verilmektedir.

63µm elekten geçecek şekilde öğütülen numuneler, krözelere konularak CONRAD NABER marka kül fırınında 110°C'de 2 saat, 550°C'de 1 saat ve 1100°C'de 1 saat kızdırılmış ve her işlem sonrasında desikatörde soğutularak hassas terazi ile ağırlığı ölçülmüştür. Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9'da belirtilen değerlere göre, 1100°C'de ki CO<sub>2</sub> kaybının 550°C'deki kimyasal bağ suyu (H<sub>2</sub>O) kaybına oranından harcın hidrolikliği tespit edilmiştir. Buna göre örnekler 3,8-8,2 oranında değerlere sahip olup, hidrolik özellik taşımaktadırlar.

Harcın hidrolik özellik taşıması, karışımda kullandığımız saf kireç ile puzolanların reaksiyonu sonucunda gerçekleşmektedir. Bu reaksiyon sonucunda kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alüminat hidrat bileşenleri oluşmaktadır ve oluşan bu ürünler harcın yüksek mekanik dayanıma sahip olmasına etkendir (Lea, 1940).

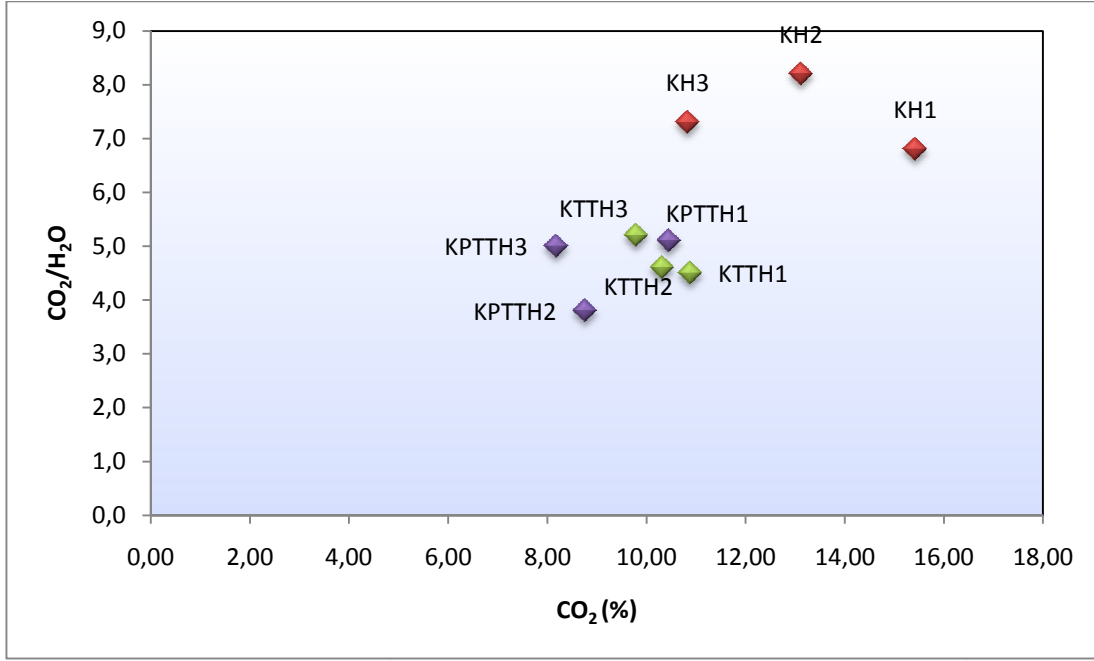
Ayrıca harç numunelerinin 10 gr lık ve 5 gr lık miktarı üzerinde yapılan analizler sonucu bulunan değerlerde belirgin bir fark görülmemiş, buradan malzeme miktarının kızdırma kaybı analizi sonucuna etkisinin olmadığı görülmüştür.

**Çizelge 5.8:** Harçların kimyasal bağ suyu (H<sub>2</sub>O), CO<sub>2</sub> yüzdeleri ve CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O oranları\_10 g harç numunesi ile yapılan deney sonuçları.

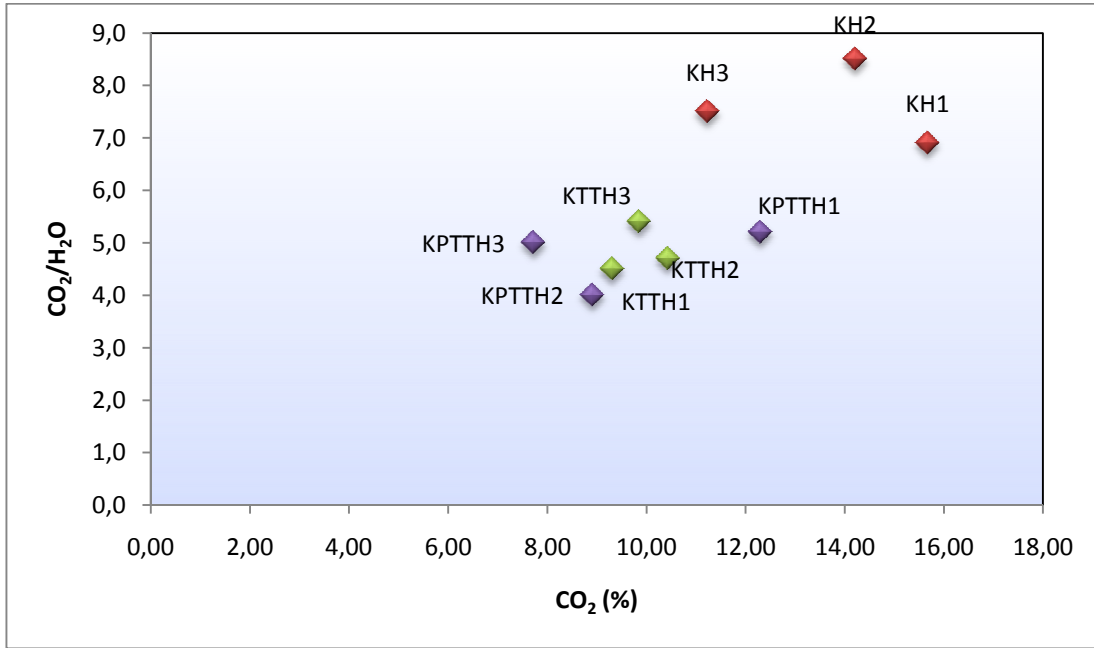
	Numune Adı	H2O (%)	CO2(%)	CO2/H2O
Seri 1	KH1	2,25%	15,42%	6,8
	KH2	1,60%	13,12%	8,2
	KH3	1,48%	10,83%	7,3
Seri 2	KPTTH1	2,05%	10,45%	5,1
	KPTTH2	2,29%	8,76%	3,8
	KPTTH3	1,62%	8,18%	5,0
Seri 3	KTTH1	2,44%	10,88%	4,5
	KTTH2	2,24%	10,32%	4,6
	KTTH3	1,90%	9,79%	5,2

**Çizelge 5.9 :** Harçların kimyasal bağ suyu (H<sub>2</sub>O), CO<sub>2</sub> yüzdeleri ve CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O oranları\_5 g harç numunesi ile yapılan deney sonuçları.

	Numune Adı	H2O (%)	CO2(%)	CO2/H2O
Seri 1	KH1	2,26%	15,67%	6,9
	KH2	1,68%	14,21%	8,5
	KH3	1,50%	11,23%	7,5
Seri 2	KPTTH1	2,36%	12,30%	5,2
	KPTTH2	2,23%	8,91%	4,0
	KPTTH3	1,53%	7,72%	5,0
Seri 3	KTTH1	2,07%	9,31%	4,5
	KTTH2	2,21%	10,43%	4,7
	KTTH3	1,83%	9,85%	5,4



**Şekil 5.17 :** Harçların hidrolik özellik değerlerinin (CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O), CO<sub>2</sub> (%)’e bağlı değişimi\_10 g harç numunesi ile yapılan deney sonuçları.



**Şekil 5.18 :** Harçların hidrolik özellik değerlerinin (CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O), CO<sub>2</sub> (%)’e bağlı değişimi\_5 g harç numunesi ile yapılan deney sonuçları.



## 6. SONUÇLAR

Laboratuvar ortamında, bağlayıcı olarak kireç, agrega olarak tuğla kırığı ve az miktarda dere kumu kullanılarak bir tür horasan harcı ve bu harca iki farklı ince öğütülmüş puzolanik katkı maddesi ilave edilerek iki tür katkı maddeli horasan harcı üretilmiştir.

Üretilen harç numuneleri üzerinde, orijinal harçlar üzerinde uygulanan deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarına ve deney sırasındaki gözlemlere göre, hazırlanan harçların fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir.

Fiziksel deneyler 28 günlük numuneler üzerinde, mekanik deneyler ise 28, 60 ve 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ilk 7 gün etüvde bekletilen 28 günlük numuneler üzerinde de ultrases deneyi ve mekanik deneyler yapılmıştır. Son olarak kimyasal analizlerle malzemelerin bileşen özelliklerinin sağlanması yapılmış, bu şekilde uygulanan deneysel metodoloji de test edilmiştir. Puzolanik harçların uzun sürede dayanım kazandığı göz önüne alınırsa, elde edilen sonuçlarda puzolanik özelliklerin tam olarak ortaya çıkmamış olduğu unutulmamalıdır.

Deneysel çalışmalarda elde edilen veriler literatür araştırmasının ışığında değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmede varılan sonuçlar aşağıda toplu olarak verilmektedir:

- Kılcallık ve su emme deneyleri sonuçlarına göre, ağırlıkça su emme değerleri %19-27, hacimce su emme değerleri ise %30-38 arasında bulunmuştur. Bu değerlerin, ince öğütülmüş puzolanik maddeler ilave ettiğimiz horasan harçlarında, puzolanik etkiden dolayı azaldığını söylemek mümkündür. Kılcallık katsayısı değerleri de, su emme yüzdeleriyle aynı şekilde değişmektedir. İnce öğütülmüş puzolan katılan harç numunelerinde, suyun kılcal boşluklarda yükselme katsayısı azalmaktadır.
- Hazırlanan horasan harçlarında birim hacim ağırlık değerleri 1,40-1,55 g/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Yapılan literatür araştırmalarına göre, bulunan değerler tarihi

harçların yoğunluk değerlerinin bulunduğu aralığa yakındır. Karışıma ince öğütülmüş malzeme katılması sonucu üretilen seri 2 ve seri 3 ün harç numunelerinde birim hacim ağırlıkları seri 1 e göre artış göstermektedir.

- Hazırlanan horasan harçlarında açık gözeneklilik değerleri %30-40 arasında bulunmuştur. Bulunan değerler tarihi horasan harçlarının yüksek gözeneklilik değerlerine yakındır. Horasan harcına ince öğütülmüş puzolanik katkıların ilave edilmesi ile oluşturulan seri 2 ve seri 3 harç numunelerinde ise açık gözeneklilik yüzdeleri seri 1 e göre azalmaktadır.

- Ultrases hızının, gözeneklilik değerleri arttıkça azalmakta olduğu ve ultrases hızındaki artışın dayanım ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Harç numunelerine uygulanan ultrases deneyi sonuçlarına göre, ultrases hızları zamana bağlı olarak artış göstermektedir. Seri 2 ve seri 3 de harç karışımlarına ince öğütülmüş puzolanik malzeme ilave edilmesi ultrases hızını arttırmakta, dolayısı ile malzemelerin dayanımını da arttırmaktadır.

- Rötire deneyi sonuçlarına göre, puzolanik katkı maddesi katılmayan seri 1 deki rötire miktarı, öğütülmüş puzolan katılan seri 2 ve seri 3 e göre daha yüksektir. Aynı zamanda, rötire miktarındaki artış hızı da karışımlara öğütülmüş puzolanın ilave edilmesi ile birlikte düşmektedir.

- Mekanik deney sonuçlarında ise, harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımlarının, 28., 60. ve 90. günlerde yapılan deneyler sonucunda gittikçe arttığı tespit edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanım değerleri ince öğütülmüş puzolan katılan harçlarda, katkı maddesi ilave edilmeyen horasan harçlarına göre daha yüksektir. 90 günlük numuneler için ponza taşı tozu katılan numunelerin ve tuğla tozu katılan numunelerin basınç dayanımları, katkı maddesi katılmayan numunelerin basınç dayanımına göre sırasıyla, % 164 ve %102 artmaktadır. Bu durum, puzolanik etkinin ve dayanımın puzolanların inceliğinin artması sonucu arttığını göstermektedir. 90 günlük numunelerde bile basınç dayanımlarının yüksek olmasında, numunelerin boyutlarının küçük olmasının ve bu nedenle karbonatlaşmanın hızlanmış olmasının avantajı olduğu söylenebilir. Eğilme dayanımlarındaki artış yüzdesi ise basınç dayanımına göre daha düşüktür.

- Asit kaybı kimyasal analizi sonucunda oranları bilinen harç karışımlarının sağlaması yapılmış ve deney numunelerinin miktarları değiştirilerek, deney

sonuçlarının değişimleri gözlenmiştir. Deney için belirlenen miktarın azaltılması durumunda bağlayıcı/agrega oranlarında hata payının arttığı görülmüştür.

- Horasan harç ve sıvalarının hidrolik özellik gösterdiği bilinmektedir. Yapılan kızdırma kaybı deneyleri sonrasında hazırlanan horasan harcı numunelerinin CO<sub>2</sub>/kimyasal su oranı 1-10 arasında kalmaktadır. Bu sebeple, numunelerinin hidrolik özellik gösterdiği belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre:

Gerekli puzolanik aktiviteyi gösteren doğal puzolanların harç içerisine ince öğütölmüş olarak ilave edilmesinin harcın dayanımını ve harcın hidrolik özelliklerini arttırdığı söylenebilmektedir.

Geleneksel teknolojilerde kullanıldığı gibi yapay puzolan olan tuğla tozu da öğütölerek doğal puzolan yerine katkı maddesi olarak kullanılabilir. Dayanım deneyleri ve diğer deneyler sonucunda, tuğla tozu ile ponza taşı tozu kullanılan harçlarda benzer sonuçlar elde edilmiştir. Uygun puzolanın, ideal miktarlarda kullanılması, nihai dayanımı arttırmakta ve harcın yapısal özelliklerini geliştirmektedir.



## KAYNAKLAR

- Akman, M., Güner, A., Aksoy, İ.,** 1986. Horasan harcı ve betonunun tarihi ve teknik özellikleri. *II. Uluslararası türk-islam bilim ve teknoloji tarihi kongresi*, İ.T.Ü., İstanbul.
- Akman, S.,** 1987. *Yapı malzemeleri*, İ.T.Ü İnşaat, İstanbul.
- Akman, S.,** 2003. Yapı malzemelerinin tarihsel gelişimi. *Türkiye Mühendislik Haberleri* (426), 30-36.
- ASTM C1324-10.,** 2010. *Standard Test Method for Examination and Analysis of Hardened Masonry Mortar*.
- Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A., Zendri, E.,** 1998. Characterization of Structural Byzantine Mortars by Thermogravimetric Analysis. *Thermochimica Acta* , 1-2 (321), 151-160.
- Baronia, G., Binda, L.,** 1997. Study of the Puzzolanicity of Some Bricks and Clays. *Construction and Building Materials* (11/1), 41-46.
- Baronia, G., Binda, L., Lombardini, N.,** 1997. The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks. *Construction and Building Materials* (11), 33-40.
- Boynton, R.,** 1980. *Chemistry and technology of lime and limestone* (2nd Edition b.). New York: John Wiley & Sons.
- Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B.,** 2004. Tarihi yapılarda kullanılan horasan harcı ve sıvalarının özellikleri. *Yapı Dergisi* (269).
- Böke, H., Özkaya, Ö., İpekoğlu, B.,** 2006. Roma dönemi tuğla ve harçların özellikleri: Bergama Serapis Tapınağı örneği. 3. *Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi* (s. 616-627), TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, İstanbul.
- Brady, N., Weil, R.,** 2001. *The Nature and Properties of Soils* (13 b.). New York: Prentice Hall.
- Bungey, J., Millard, S., Grantham, M.,** 2006. *Testing of Concrete in Structures* (4. b.). New York: Taylor & Francis Group.
- Edvin, C., Eckel, C.,** 1928. *Cements, Limes and Plasters*. New York: John Wiley & Sons.
- Ekşi Akbulut, D.,** 2006. Tarihi yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesi onarım ve güçlendirmede malzeme seçimi. *Doktora tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Erdoğan, S., Erdoğan, T.,** 2007. Pozolanik mineral katkıları ve tarihi geçmişleri. 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, (s. 263-275). Ankara.
- Ersen, A., Karagüler, M., Güleç, A.,** 1995. Possible substitutes for khorasan mortar in Byzantine and Ottoman monuments. *Methods of Evaluating Products for the Conservation of Porous Building Materials in Monuments* (s. 15-27). Rome: ICCROM.
- Güleç, A.,** 1992. *Bazı tarihi anıt harç ve sıvalarının incelenmesi*. Doktora Tezi, İ.T.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Güleç, A., Tulun, T.,** 1997. Physico-chemical and petrographical studies of old mortars and plasters of Anatolia. *Cement and Concrete Research*, Vol.27 (No.2), 227-234.
- He, C., Bjarne, O., Emil, M.,** 1995. Puzzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research* (28/8), 1691-1702.
- Jedrzejewska, H.,** 1981. Ancient mortars as criterion in analysis of old architecture. *Proceedings of symposium on mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings*, (s. 311-329), Rome.
- Krumnacher, P.,** 2001. *Lime and cement technology: Transition from traditional to standardized treatment methods*. M.Sc. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Lea, F.,** 1940. Investigations on pozzolanas building research. *Technical paper* (No:27), 1-63.
- McClellan, G., Eades, J.,** 1970. The texture evolution of limestone calcines. *ASTM Special technical publication 472* (s. 209-227), American society for testing and materials, Philadelphia.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., Anagnostopoulou, S.,** 2005. Composite materials in ancient structures. *Cement & Concrete Composites* (27), 295-300.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K.,** 2000a. Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage* (Vol.1), 45-58.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K.,** 2000b. Physico-chemical and cohesion bonds in koints mortars imparting durability to the historic structures., (s. 35-46).
- Palomo, A., Blanco-Varela, M., Martinez-Ramirez, S., Puertas, F., Fortes, C.,** *Historic Mortars: Characterization and Durability. New Tendencies for Research*. 31.05.2011 tarihinde [http://www.arcchip.cz/w09/w09\\_palomo.pdf](http://www.arcchip.cz/w09/w09_palomo.pdf). adresinden alındı.
- Pavia, S., Treacy, E.,** 2006. A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars. *Materials and Structures* (39), 391-398.
- Postacıoğlu, B.,** 1981. *Cisimlerin yapısı ve özellikleri-içyapı ve mekanik özellikler* (Cilt 1), İTÜ matbaası, İstanbul.

- Prince, W., Castanier, G., Giafferi, J.,** 2001. Similarity between alkali-aggregate reaction and the natural alteration of rocks. *Cement and Concrete Research* (31), 271-276.
- RILEM.,** 2005. Investigative methods for the characterisation of historic mortars- Part 1 and Part 2., (s. 761-769, 771-780).
- Rodriquez-Navarro, C., Hansen, E., Ginell, W.,** 1998. Calcium hydroxide crystal evolution upon ageing of lime putty. *Journal of the American Ceramic Society* (81), 3032-3034.
- Satongar, L.,** 1994. İstanbul şehir surları horasan harçları üzerine bir araştırma. *Yayınlanmamış yüksek lisans tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Silva, D., Wenk, H., Monteiro, P.,** 2005. Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern. *Thermochimica Acta* 438 , 35-40.
- Swenson, E., Sereda, P.,** 1968. Mechanism of the carbonation shrinkage of lime and hydrated cement. *Journal of Applied Chemistry* (18), 111-117.
- Şimşek, O.,** 2007. *Yapı Malzemesi II*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- TS 25.,** 2008. Doğal puzolan (tras)- çimento ve betonda kullanılan - tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 1015-10.,** 2001. Kâgir Harcı-Deney Metotları- Bölüm 10: Sertleşmiş Harcın Boşluklu Kuru Birim Hacim Kütlelerinin Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12086.,** 2002. Isı yalıtım malzemeleri-binalar için-su buharı geçirgenlik özelliklerinin tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 13755.,** 2009. Doğal taşlar-deney metotları-atmosfer basıncında su emme tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 14579.,** 2006. Doğal taşlar-deney metotları-ses hızı ilerlemesinin tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 1925.,** 2000. Doğal taşlar-deney metotları-kılcal etkiye bağlı su emme katsayısının tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 1936.,** 2010. Doğal taşlar-deney yöntemleri-gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 196-1.,** 2009. Çimento Deney Metotları-Bölüm 1-Dayanım Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- Uğurlu, E.,** 2005. Characterization of horasan plasters from some ottoman baths in İzmir. *Yayınlanmamış yüksek lisans tezi*, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- Uğurlu, E., Böke, H.,** 2010. Koruma amaçlı üretilecek horasan harç ve sıvalarda kullanılacak kirecin ve tuğlaların özellikleri. 5. *Ulusal yapı malzemesi kongresi ve sergisi* (s. 385-396), TBMM Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, İstanbul.

**Uğurlu, E., Böke, H.,** 2006. Osmanlı dönemi hamam yapılarında kullanılan horasan sıvaların özellikleri. 3. *Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi* (s. 585-596), TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi, İstanbul.

**Vitruvius.,** 1990. *Mimarlık üzerine on kitap*, Şevki Vanlı Mimarlık Vakfı, İstanbul.

**Url-1** <[http://www.icomos.org/venice\\_charter.html](http://www.icomos.org/venice_charter.html)>, alındığı tarih 03.05.2011.



## **EKLER**

**EK A:** Çizelgeler

**EK B:** Şekiller



**EK A****Çizelge A.1 : Puzolanik aktivite analizi-eğilme basınç dayanımı.**

Ponza tozu + Kireç harcı	a (mm)	b (mm)	L (mm)	L (mesnet açıklığı) (mm)	Eğilme (N)	Basınç 1 (N)	Basınç 2 (N)
1	40,22	41,80	160,70	100,00	1350	12000	12000
2	41,30	39,65	158,36	100,00	1100	13000	13000
3	40,73	39,85	159,08	100,00	1100	12000	12000
Ort	40,75	40,43	159,38	100,00	1183	12333	

Tuğla tozu + Kireç harcı	a (mm)	b (mm)	L (mm)	L (mesnet açıklığı) (mm)	Eğilme (N)	Basınç 1 (N)	Basınç 2 (N)
1	40,43	41,84	161,15	100,00	1000	18000	14500
2	40,35	41,82	161,20	100,00	1350	16000	15000
3	40,45	41,48	160,88	100,00	1150	15000	14500
Ort	40,41	41,71	161,08	100,00	1167	15500	

**Çizelge A.2 : KH1 karışımı kılcallık deney çizelgesi.**

	KH1-1	Q	N	KH1-2	Q	N	KH1-3	Q	N
a (cm)	4,11			4,07			4,09		
b (cm)	4,01			3,99			3,96		
h (cm)	15,97			15,93			15,84		
A (cm <sup>2</sup> )	16,48			16,24			16,20		
Ortam nem ağırlığı	366,76			362,98			361,42		
İlk ağırlık	367,89			363,98			362,27		
4 dakika ağırlığı	377,35	9,46	0,28700	372,54	8,56	0,26356	368,90	6,63	0,20468
9 dakika ağırlığı	382,49	14,60	0,29529	377,08	13,10	0,26890	372,16	9,89	0,20354
16 dakika ağırlığı	388,73	20,84	0,31612	382,91	18,93	0,29142	376,99	14,72	0,22721
25 dakika ağırlığı	394,54	26,65	0,32340	388,49	24,51	0,30186	381,52	19,25	0,23771
36 dakika ağırlığı	400,47	32,58	0,32947	394,03	30,05	0,30841	386,16	23,89	0,24584
49 dakika ağırlığı	405,80	37,91	0,32860	399,06	35,08	0,30860	390,36	28,09	0,24776
1 saat 04 dakika ağırlığı	411,60	43,71	0,33152	404,44	40,46	0,31144	394,67	32,40	0,25006
1 saat 21 dakika ağırlığı	416,81	48,92	0,32981	409,50	45,52	0,31145	399,01	36,74	0,25205
1 saat 40 dakika ağırlığı	422,21	54,32	0,32959	414,56	50,58	0,31147	403,22	40,95	0,25283
2 saat 01 dakika ağırlığı	427,60	59,71	0,32936	419,81	55,83	0,31254	407,46	45,19	0,25365
2 saat 24 dakika ağırlığı	432,70	64,81	0,32770	424,73	60,75	0,31174	411,47	49,20	0,25314
2 saat 49 dakika ağırlığı	437,62	69,73	0,32545	429,50	65,52	0,31036	415,14	52,87	0,25110
N <sub>ort</sub>			0,32111			0,30098			0,23996

**Çizelge A.3 : KH1 karışımı su emme deney çizelgesi.**

KH1	KH1-1	KH1-2	KH1-3	KH1-ORT
Ortam nem ağırlığı (W <sub>0</sub> )	366,77	362,98	361,42	363,72
Suya doymuş ağırlık (W <sub>1</sub> )	464,78	460,24	458,67	461,23
Su içindeki ağırlık (W <sub>2</sub> )	207,40	204,10	203,40	204,97
Ağırlıkça su emme [ $A_b = (W_1 - W_0) / W_0$ ]	26,7%	26,8%	26,9%	26,8%
Hacimce su emme yüzdesi [ $A_h = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	38,1%	38,0%	38,1%	38,0%
Birim hacim ağırlık [ $\Delta = W_0 / (W_1 - W_2)$ ]	1,43	1,42	1,42	1,42
Özgül Ağırlık [ $\delta$ ]	2,46	2,46	2,46	2,46
Porozite yüzdesi [ $p = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	38,1%	38,0%	38,1%	38,0%

**Çizelge A.4 : KH2 karışımı kılcallık deney çizelgesi.**

	KH2-1	Q	N	KH2-2	Q	N	KH2-3	Q	N
a (cm)	4,03			4,00			4,01		
b (cm)	3,97			3,97			3,95		
h (cm)	15,77			15,83			15,82		
A (cm <sup>2</sup> )	16,00			15,88			15,84		
Ortam nem ağırlığı	351,60			354,71			353,15		
Parafinli ağırlık	352,27			355,38			353,82		
İlk ağırlık	352,30			355,45			353,90		
4 dakika ağırlığı	352,93	0,63	0,01969	356,30	0,85	0,02676	354,32	0,42	0,01326
9 dakika ağırlığı	362,40	10,10	0,21043	366,00	10,55	0,22145	362,02	8,12	0,17088
16 dakika ağırlığı	368,70	16,40	0,25626	372,31	16,86	0,26543	367,40	13,50	0,21307
25 dakika ağırlığı	372,34	20,04	0,25051	376,12	20,67	0,26033	370,53	16,63	0,20998
36 dakika ağırlığı	376,91	24,61	0,25637	380,20	24,75	0,25976	373,88	19,98	0,21023
49 dakika ağırlığı	379,65	27,35	0,24421	384,05	28,60	0,25729	375,64	21,74	0,19607
1 saat 04 dakika ağırlığı	382,84	30,54	0,23861	386,15	30,70	0,24166	378,49	24,59	0,16939
1 saat 21 dakika ağırlığı	385,75	33,45	0,23230	389,00	33,55	0,23475	381,70	27,80	0,19501
1 saat 40 dakika ağırlığı	389,65	37,35	0,23345	392,76	37,31	0,23495	385,08	31,18	0,19685
2 saat 01 dakika ağırlığı	392,71	40,41	0,22962	395,79	40,34	0,23094	387,52	33,62	0,19296
2 saat 24 dakika ağırlığı	395,96	43,66	0,22741	399,09	43,64	0,22901	389,92	36,02	0,18951
2 saat 49 dakika ağırlığı	399,41	47,11	0,22650	402,63	47,18	0,22854	392,59	38,69	0,18789
N <sub>ort</sub>			0,21878			0,22424			0,17876

**Çizelge A.5 : KH2 karışımı su emme deney çizelgesi.**

KH2	KH2-1	KH2-2	KH2-3	KH2-ORT
Ortam nem ağırlığı (W <sub>0</sub> )	351,60	354,71	353,15	353,15
Suya doymuş ağırlık (W <sub>1</sub> )	443,06	447,84	446,02	445,64
Su içindeki ağırlık (W <sub>2</sub> )	196,80	199,30	198,40	198,17
Ağırlıkça su emme [ $A_b = (W_1 - W_0) / W_0$ ]	26,0%	26,3%	26,3%	26,2%
Hacimce su emme yüzdesi [ $A_h = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	37,1%	37,5%	37,5%	37,4%
Birim hacim ağırlık [ $\Delta = W_0 / (W_1 - W_2)$ ]	1,43	1,43	1,43	1,43
Özgül Ağırlık [ $\delta$ ]	2,51	2,51	2,51	2,51
Porozite yüzdesi [ $p = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	37,1%	37,5%	37,5%	37,4%

**Çizelge A.6 : KH3 karışımı kılcallık deney tablosu.**

	KH3-1	Q	N	KH3-2	Q	N	KH3-3	Q	N
a (cm)	4,06			4,15			4,14		
b (cm)	3,98			3,97			4,00		
h (cm)	15,79			15,85			15,85		
A (cm <sup>2</sup> )	16,16			16,48			16,56		
Ortam nem ağırlığı	375,31			377,15			379,62		
Parafinli ağırlık	376,41			377,66			380,10		
İlk ağırlık	377,45			378,62			381,07		
4 dakika ağırlığı	384,18	6,73	0,20825	385,70	7,08	0,21486	387,92	6,85	0,20682
9 dakika ağırlığı	387,80	10,35	0,21351	389,07	10,45	0,21143	391,30	10,23	0,20592
16 dakika ağırlığı	390,07	12,62	0,19525	392,27	13,65	0,20713	394,28	13,21	0,19943
25 dakika ağırlığı	394,87	17,42	0,21561	395,83	17,21	0,20892	397,85	16,78	0,20266
36 dakika ağırlığı	398,09	20,64	0,21289	398,99	20,37	0,20606	400,86	19,79	0,19917
49 dakika ağırlığı	401,21	23,76	0,21006	402,04	23,42	0,20307	403,75	22,68	0,19565
1 saat 04 dakika ağırlığı	404,94	27,49	0,21266	405,64	27,02	0,20500	407,14	26,07	0,17177
1 saat 21 dakika ağırlığı	408,15	30,70	0,21110	406,65	28,03	0,18903	410,15	29,08	0,19512
1 saat 40 dakika ağırlığı	411,08	33,63	0,20812	411,68	33,06	0,20066	412,79	31,72	0,19155
2 saat 01 dakika ağırlığı	414,86	37,41	0,21047	415,38	36,76	0,20284	416,40	35,33	0,19395
2 saat 24 dakika ağırlığı	418,19	40,74	0,21010	418,69	40,07	0,20267	419,60	38,53	0,19389
2 saat 49 dakika ağırlığı	421,45	44,00	0,20946	421,95	43,33	0,20231	422,64	41,57	0,19310
N <sub>ort</sub>			0,20979			0,20450			0,19575

**Çizelge A.7 : KH3 karışımı su emme deney çizelgesi.**

KH3	KH3-1	KH3-2	KH3-3	KH3-ORT
Ortam nem ağırlığı (W <sub>0</sub> )	375,31	377,15	379,62	377,36
Suya doymuş ağırlık (W <sub>1</sub> )	464,12	465,43	468,13	465,89
Su içindeki ağırlık (W <sub>2</sub> )	211,20	211,80	214,20	212,40
Ağırlıkça su emme [ $A_b = (W_1 - W_0) / W_0$ ]	23,7%	23,4%	23,3%	23,5%
Hacimce su emme yüzdesi [ $A_h = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	35,1%	34,8%	34,9%	34,9%
Birim hacim ağırlık [ $\Delta = W_0 / (W_1 - W_2)$ ]	1,48	1,49	1,49	1,49
Özgül Ağırlık [ $\delta$ ]	2,51	2,51	2,51	2,51
Porozite yüzdesi [ $p = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	35,1%	34,8%	34,9%	34,9%

**Çizelge A.8 : KPTTH1 karışımı kılcallık deney çizelgesi.**

	KPTTH 1-1	Q	N	KPTTH 1-2	Q	N	KPTTH 1-3	Q	N
a (cm)	4,04			4,10			4,11		
b (cm)	3,99			4,00			3,96		
h (cm)	15,86			15,86			15,87		
A (cm <sup>2</sup> )	16,12			16,40			16,28		
Ortam nem ağırlığı	373,77			372,56			376,04		
Parafinli ağırlık	374,16			372,90			376,46		
İlk ağırlık	374,64			373,27			376,87		
4 dakika ağırlığı	379,34	4,70	0,14579	379,15	5,88	0,17927	382,99	6,12	0,18801
9 dakika ağırlığı	382,51	7,87	0,16274	382,19	8,92	0,18130	384,92	8,05	0,16487
16 dakika ağırlığı	386,01	11,37	0,17634	385,57	12,30	0,18750	388,26	11,39	0,17496
25 dakika ağırlığı	391,42	16,78	0,20819	389,69	16,42	0,20024	392,20	15,33	0,18838
36 dakika ağırlığı	394,21	19,57	0,20234	392,47	19,20	0,19512	394,95	18,08	0,18514
49 dakika ağırlığı	398,49	23,85	0,21137	395,84	22,57	0,19660	398,26	21,39	0,18775
1 saat 04 dakika ağırlığı	401,82	27,18	0,21077	399,34	26,07	0,19870	401,72	24,85	0,16659
1 saat 21 dakika ağırlığı	404,80	30,16	0,20789	402,49	29,22	0,19797	404,71	27,84	0,19006
1 saat 40 dakika ağırlığı	408,31	33,67	0,20888	406,22	32,95	0,20091	408,46	31,59	0,19409
2 saat 01 dakika ağırlığı	411,63	36,99	0,20861	409,76	36,49	0,20227	411,89	35,02	0,19561
2 saat 24 dakika ağırlığı	415,48	40,84	0,21113	413,80	40,53	0,20595	415,85	38,98	0,19958
2 saat 49 dakika ağırlığı	418,21	43,57	0,20792	416,62	43,35	0,20333	418,60	41,73	0,19723
N <sub>ort</sub>			0,19683			0,19576			0,18602

**Çizelge A.9 : KPTTH1 karışımı su emme deney çizelgesi.**

KPTTH1	KPTTH 1-1	KPTTH 1-2	KPTTH 1-3	KPTTH1 ORT
Ortam nem ağırlığı (W <sub>0</sub> )	373,77	372,56	376,04	374,12
Suya doymuş ağırlık (W <sub>1</sub> )	463,61	461,66	464,99	463,42
Su içindeki ağırlık (W <sub>2</sub> )	210,30	209,80	211,60	210,57
Ağırlıkça su emme [ $A_b = (W_1 - W_0) / W_0$ ]	24,0%	23,9%	23,7%	23,9%
Hacimce su emme yüzdesi [ $A_h = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	35,5%	35,4%	35,1%	35,3%
Birim hacim ağırlık [ $\Delta = W_0 / (W_1 - W_2)$ ]	1,48	1,48	1,48	1,48
Özgül Ağırlık [ $\delta$ ]	2,63	2,63	2,63	2,63
Porozite yüzdesi [ $p = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	35,5%	35,4%	35,1%	35,3%

**Çizelge A.10 : KPTTH2 karışımı kılcallık deney çizelgesi.**

	KPTTH 2-1	Q	N	KPTTH 2-2	Q	N	KPTTH 2-3	Q	N
a (cm)	4,21			4,16			4,15		
b (cm)	4,02			3,97			4,00		
h (cm)	15,98			15,93			15,95		
A (cm <sup>2</sup> )	16,92			16,52			16,60		
Ortam nem ağırlığı	402,61			401,65			396,25		
Parafinli ağırlık	402,91			401,93			396,57		
İlk ağırlık	402,99			402,02			396,69		
4 dakika ağırlığı	408,70	5,71	0,16869	408,18	6,16	0,18649	400,60	3,91	0,11777
9 dakika ağırlığı	411,17	8,18	0,16111	410,74	8,72	0,17600	402,45	5,76	0,11566
16 dakika ağırlığı	414,46	11,47	0,16943	414,04	12,02	0,18195	405,28	8,59	0,12937
25 dakika ağırlığı	418,05	15,06	0,17797	417,70	15,68	0,18989	408,72	12,03	0,14494
36 dakika ağırlığı	421,71	18,72	0,18435	421,39	19,37	0,19548	412,23	15,54	0,15602
49 dakika ağırlığı	425,50	22,51	0,19001	425,10	23,08	0,19964	415,88	19,19	0,16515
1 saat 04 dakika ağırlığı	428,63	25,64	0,18937	428,18	26,16	0,19800	418,85	22,16	0,14565
1 saat 21 dakika ağırlığı	431,93	28,94	0,19000	431,35	29,33	0,19733	421,99	25,30	0,16934
1 saat 40 dakika ağırlığı	435,87	32,88	0,19428	435,15	33,13	0,20060	425,72	29,03	0,17488
2 saat 01 dakika ağırlığı	438,93	35,94	0,19305	438,08	36,06	0,19849	428,62	31,93	0,17486
2 saat 24 dakika ağırlığı	443,00	40,01	0,19701	441,88	39,86	0,20113	432,40	35,71	0,17927
2 saat 49 dakika ağırlığı	447,05	44,06	0,20026	445,09	43,07	0,20061	435,41	38,72	0,17943
N <sub>ort</sub>			0,18463			0,19380			0,15436

**Çizelge A.11 : KPTTH2 karışımı su emme deney çizelgesi.**

KPTTH2	KPTTH 2-1	KPTTH 2-2	KPTTH 2-3	KPTTH2 ORT
Ortam nem ağırlığı (W <sub>0</sub> )	402,61	401,65	396,25	400,17
Suya doymuş ağırlık (W <sub>1</sub> )	490,93	488,69	480,82	486,81
Su içindeki ağırlık (W <sub>2</sub> )	226,30	225,30	220,20	223,93
Ağırlıkça su emme [ $A_b = (W_1 - W_0) / W_0$ ]	21,9%	21,7%	21,3%	21,7%
Hacimce su emme yüzdesi [ $A_h = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	33,4%	33,0%	32,4%	33,0%
Birim hacim ağırlık [ $\Delta = W_0 / (W_1 - W_2)$ ]	1,52	1,52	1,52	1,52
Özgül Ağırlık [ $\delta$ ]	2,54	2,54	2,54	2,54
Porozite yüzdesi [ $p = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	33,4%	33,0%	32,4%	33,0%



**Çizelge A.12 : KPTTH3 karışımı kılcallık deney çizelgesi.**

	KPTTH 3-1	Q	N	KPTTH 3-2	Q	N	KPTTH 3-3	Q	N
a (cm)	4,23			4,21			4,20		
b (cm)	3,99			4,01			3,98		
h (cm)	15,97			15,97			15,97		
A (cm <sup>2</sup> )	16,88			16,88			16,72		
Ortam nem ağırlığı	400,34			398,20			405,13		
Parafinli ağırlık	400,68			398,53			405,45		
İlk ağırlık	400,93			398,75			405,70		
4 dakika ağırlığı	403,74	2,81	0,08325	400,78	2,03	0,06012	408,25	2,55	0,07627
9 dakika ağırlığı	405,83	4,90	0,09677	402,47	3,72	0,07345	410,19	4,49	0,08953
16 dakika ağırlığı	408,60	7,67	0,11361	404,81	6,06	0,08974	412,88	7,18	0,10738
25 dakika ağırlığı	411,26	10,33	0,12241	407,18	8,43	0,09987	415,49	9,79	0,11713
36 dakika ağırlığı	414,50	13,57	0,13400	410,10	11,35	0,11205	418,46	12,76	0,12722
49 dakika ağırlığı	416,89	15,96	0,13509	412,25	13,50	0,11424	420,70	15,00	0,12819
1 saat 04 dakika ağırlığı	420,37	19,44	0,14398	415,27	16,52	0,12232	423,85	18,15	0,11847
1 saat 21 dakika ağırlığı	423,14	22,21	0,14622	417,99	19,24	0,12663	426,45	20,75	0,13793
1 saat 40 dakika ağırlığı	425,00	24,07	0,14261	420,13	21,38	0,12664	428,87	23,17	0,13861
2 saat 01 dakika ağırlığı	429,35	28,42	0,15308	423,16	24,41	0,13145	431,91	26,21	0,14254
2 saat 24 dakika ağırlığı	432,21	31,28	0,15444	425,82	27,07	0,13362	434,55	28,85	0,14382
2 saat 49 dakika ağırlığı	435,17	34,24	0,15605	428,36	29,61	0,13492	437,09	31,39	0,14445
<b>N<sub>ort</sub></b>			0,13179			0,11042			0,12263

**Çizelge A.13 : KPTTH3 karışımı su emme deney çizelgesi.**

KPTTH3	KPTTH 3-1	KPTTH 3-2	KPTTH 3-3	KPTTH3 ORT
Ortam nem ağırlığı (W <sub>0</sub> )	400,34	398,20	405,13	401,22
Suya doymuş ağırlık (W <sub>1</sub> )	477,49	483,71	482,34	481,18
Su içindeki ağırlık (W <sub>2</sub> )	217,30	220,70	219,80	219,27
Ağırlıkça su emme [ $A_b = (W_1 - W_0) / W_0$ ]	19,3%	21,5%	19,1%	19,9%
Hacimce su emme yüzdesi [ $A_h = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	29,7%	32,5%	29,4%	30,5%
Birim hacim ağırlık [ $\Delta = W_0 / (W_1 - W_2)$ ]	1,54	1,51	1,54	1,53
Özgül Ağırlık [ $\delta$ ]	2,62	2,62	2,62	2,62
Porozite yüzdesi [ $p = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	29,7%	32,5%	29,4%	30,5%

**Çizelge A.14 : KTTH1 karışımı kılcallık deney çizelgesi.**

	KTTH 1-1	Q	N	KTTH 1-2	Q	N	KTTH 1-3	Q	N
a (cm)	4,08			4,14			4,10		
b (cm)	3,99			3,99			3,98		
h (cm)	15,88			15,97			14,94		
A (cm <sup>2</sup> )	16,28			16,52			16,32		
Ortam nem ağırlığı	363,56			379,64			375,41		
Parafinli ağırlık	363,60			379,65			375,42		
İlk ağırlık	363,75			379,68			375,53		
4 dakika ağırlığı	366,73	2,98	0,09153	381,39	1,71	0,05176	377,86	2,33	0,07139
9 dakika ağırlığı	369,26	5,51	0,11282	382,48	2,80	0,05650	379,25	3,72	0,07599
16 dakika ağırlığı	372,21	8,46	0,12992	383,99	4,31	0,06523	381,12	5,59	0,08564
25 dakika ağırlığı	375,18	11,43	0,14042	385,82	6,14	0,07434	383,19	7,66	0,09388
36 dakika ağırlığı	378,17	14,42	0,14763	387,95	8,27	0,08344	385,52	9,99	0,10203
49 dakika ağırlığı	381,15	17,40	0,15269	390,40	10,72	0,09271	388,01	12,48	0,10926
1 saat 04 dakika ağırlığı	383,60	19,85	0,15242	392,68	13,00	0,09837	390,16	14,63	0,09782
1 saat 21 dakika ağırlığı	386,25	22,50	0,15357	398,20	18,52	0,12457	392,46	16,93	0,11528
1 saat 40 dakika ağırlığı	389,01	25,26	0,15517	397,72	18,04	0,10921	394,97	19,44	0,11913
2 saat 01 dakika ağırlığı	391,99	28,24	0,15770	400,81	21,13	0,11629	397,54	22,01	0,12262
2 saat 24 dakika ağırlığı	394,61	30,86	0,15797	403,32	23,64	0,11926	399,79	24,26	0,12389
2 saat 49 dakika ağırlığı	397,29	33,54	0,15848	405,93	26,25	0,12224	402,14	26,61	0,12544
N <sub>ort</sub>			0,14253			0,09283			0,10353

**Çizelge A.15 : KTTH3 karışımı su emme deney çizelgesi.**

KTTH1	KTTH 1-1	KTTH 1-2	KTTH 1-3	KTTH1 ORT
Ortam nem ağırlığı (W <sub>0</sub> )	363,56	379,64	375,41	372,87
Suya doymuş ağırlık (W <sub>1</sub> )	451,36	467,75	462,93	460,68
Su içindeki ağırlık (W <sub>2</sub> )	200,40	207,60	206,00	204,67
Ağırlıkça su emme [ $A_b = (W_1 - W_0) / W_0$ ]	24,2%	23,2%	23,3%	23,6%
Hacimce su emme yüzdesi [ $A_h = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	35,0%	33,9%	34,1%	34,3%
Birim hacim ağırlık [ $\Delta = W_0 / (W_1 - W_2)$ ]	1,45	1,46	1,46	1,46
Özgül Ağırlık [ $\delta$ ]	2,55	2,55	2,55	2,55
Porozite yüzdesi [ $p = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	35,0%	33,9%	34,1%	34,3%

**Çizelge A.16 : KTTH2 karışımı kılcallık deney tablosu.**

	KTTH 2-1	Q	N	KTTH 2-2	Q	N	KTTH 2-3	Q	N
a (cm)	4,13			4,11			4,15		
b (cm)	3,99			3,99			3,97		
h (cm)	15,86			15,88			15,89		
A (cm <sup>2</sup> )	16,48			16,40			16,48		
Ortam nem ağırlığı	384,92			383,32			381,72		
Parafinli ağırlık	384,93			383,33			381,73		
İlk ağırlık	384,99			383,39			381,75		
4 dakika ağırlığı	387,47	2,48	0,07525	384,92	1,53	0,04665	382,78	1,03	0,03126
9 dakika ağırlığı	389,72	4,73	0,09568	386,20	2,81	0,05712	383,63	1,88	0,03804
16 dakika ağırlığı	391,70	6,71	0,10180	387,50	4,11	0,06266	384,41	2,66	0,04036
25 dakika ağırlığı	393,49	8,50	0,10316	388,83	5,44	0,06635	385,29	3,54	0,04297
36 dakika ağırlığı	395,66	10,67	0,10792	390,44	7,05	0,07165	386,38	4,63	0,04684
49 dakika ağırlığı	397,91	12,92	0,11201	392,13	8,74	0,07614	387,51	5,76	0,04994
1 saat 04 dakika ağırlığı	400,21	15,22	0,11545	393,03	9,64	0,07348	388,73	6,98	0,04623
1 saat 21 dakika ağırlığı	402,41	17,42	0,11746	395,69	12,30	0,08334	389,40	7,65	0,05159
1 saat 40 dakika ağırlığı	404,92	19,93	0,12094	397,97	14,58	0,08891	391,23	9,48	0,05754
2 saat 01 dakika ağırlığı	407,30	22,31	0,12308	399,95	16,56	0,09180	392,23	10,48	0,05783
2 saat 24 dakika ağırlığı	409,68	24,69	0,12486	401,96	18,57	0,09437	394,61	12,86	0,06505
2 saat 49 dakika ağırlığı	411,31	26,32	0,12286	403,41	20,02	0,09391	395,86	14,11	0,06588
N <sub>ort</sub>			0,11004			0,07553			0,04946

**Çizelge A.17 : KTTH2 karışımı su emme deney tablosu**

KTTH2	KTTH 2-1	KTTH 2-2	KTTH 2-3	KTTH2 ORT
Ortam nem ağırlığı (W <sub>0</sub> )	384,92	383,32	381,72	383,32
Suya doymuş ağırlık (W <sub>1</sub> )	470,34	466,99	464,35	467,23
Su içindeki ağırlık (W <sub>2</sub> )	213,90	212,20	210,10	212,07
Ağırlıkça su emme [ $A_b = (W_1 - W_0) / W_0$ ]	22,2%	21,8%	21,6%	21,9%
Hacimce su emme yüzdesi [ $A_h = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	33,3%	32,8%	32,5%	32,9%
Birim hacim ağırlık [ $\Delta = W_0 / (W_1 - W_2)$ ]	1,50	1,50	1,50	1,50
Özgül Ağırlık [ $\delta$ ]	2,47	2,47	2,47	2,47
Porozite yüzdesi [ $p = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	33,3%	32,8%	32,5%	32,9%

**Çizelge A.18 : KTTH3 karışımı kılcallık deney çizelgesi.**

	KTTH 3-1	Q	N	KTTH 3-2	Q	N	KTTH 3-3	Q	N
a (cm)	4,00			4,00			4,00		
b (cm)	4,00			4,00			4,00		
h (cm)	16,00			16,00			16,00		
A (cm <sup>2</sup> )	16,00			16,00			16,00		
Ortam nem ağırlığı	387,19			382,96			382,87		
Parafinli ağırlık	387,25			383,03			382,88		
İlk ağırlık	387,41			383,99			382,90		
4 dakika ağırlığı	390,00	2,59	0,08094	386,01	2,02	0,06312	385,55	2,65	0,08281
9 dakika ağırlığı	392,13	4,72	0,09833	388,31	4,32	0,09000	387,59	4,69	0,09771
16 dakika ağırlığı	393,26	5,85	0,09141	389,88	5,89	0,09203	388,33	5,43	0,08484
25 dakika ağırlığı	395,43	8,02	0,10025	391,90	7,91	0,09887	390,12	7,22	0,09025
36 dakika ağırlığı	397,82	10,41	0,10844	394,16	10,17	0,10594	392,15	9,25	0,09635
49 dakika ağırlığı	400,29	12,88	0,11500	396,50	12,51	0,11170	394,32	11,42	0,10196
1 saat 04 dakika ağırlığı	403,05	15,64	0,12219	399,21	15,22	0,11891	396,91	14,01	0,09554
1 saat 21 dakika ağırlığı	405,58	18,17	0,12618	401,92	17,93	0,12451	399,48	16,58	0,11514
1 saat 40 dakika ağırlığı	407,89	20,48	0,12800	404,26	20,27	0,12669	401,72	18,82	0,11763
2 saat 01 dakika ağırlığı	409,28	21,87	0,12426	405,76	21,77	0,12369	403,12	20,22	0,11489
2 saat 24 dakika ağırlığı	411,95	24,54	0,12781	408,50	24,51	0,12766	405,84	22,94	0,11948
2 saat 49 dakika ağırlığı	414,20	26,79	0,12880	410,78	26,79	0,12880	408,01	25,11	0,12072
N <sub>ort</sub>			0,11263			0,10933			0,10311

**Çizelge A.19 : KTTH3 karışımı su emme deney çizelgesi.**

KTTH3	KTTH 3-1	KTTH 3-2	KTTH 3-3	KTTH3 ORT
Ortam nem ağırlığı (W <sub>0</sub> )	387,19	382,96	382,87	384,34
Suya doymuş ağırlık (W <sub>1</sub> )	471,41	466,78	467,26	468,48
Su içindeki ağırlık (W <sub>2</sub> )	214,20	212,30	212,80	213,10
Ağırlıkça su emme [ $A_b = (W_1 - W_0) / W_0$ ]	21,8%	21,9%	22,0%	21,9%
Hacimce su emme yüzdesi [ $A_h = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	32,7%	32,9%	33,2%	32,9%
Birim hacim ağırlık [ $\Delta = W_0 / (W_1 - W_2)$ ]	1,51	1,50	1,50	1,50
Özgül Ağırlık [ $\delta$ ]	2,48	2,48	2,48	2,48
Porozite yüzdesi [ $p = (W_1 - W_0) / (W_1 - W_2)$ ]	32,7%	32,9%	33,2%	32,9%

**Çizelge A.20 : Buhar geçirgenlik deney tablosu.**

Numune Adları	°C-NE/M	r <sub>ort</sub> (m)	d <sub>ort</sub> (m)	1/d <sub>ort</sub> (m)	Alan (m <sup>2</sup> )	d <sub>H</sub> (m)	δ <sub>h</sub>	P <sub>1</sub>	G	P <sub>1</sub> /G	μ
Seri 1	KH1	0,0695	0,0144	6,93E+01	0,0031	0,015	7,026321E-07	2808,4	2,20E-05	1,2765E+08	18,53
	KH2	0,0698	0,0146	6,86E+01	0,0032	0,015	7,026321E-07	2808,4	1,96E-05	1,4329E+08	21,02
	KH3	0,0698	0,0140	7,12E+01	0,0031	0,015	7,026321E-07	2808,4	1,96E-05	1,4329E+08	21,01
Seri 2	KPTTH1	0,0721	0,0149	6,71E+01	0,0034	0,015	7,026321E-07	2808,4	2,96E-05	9,4878E+07	14,09
	KPTTH2	0,0720	0,0158	6,32E+01	0,0036	0,015	7,026321E-07	2808,4	2,73E-05	1,0287E+08	15,40
	KPTTH3	0,0720	0,0156	6,41E+01	0,0035	0,015	7,026321E-07	2808,4	2,90E-05	9,6841E+07	14,43
Seri 3	KTTH1	0,0731	0,0158	6,31E+01	0,0036	0,015	7,026321E-07	2808,4	2,86E-05	9,8196E+07	14,88
	KTTH2	0,0721	0,0157	6,39E+01	0,0035	0,015	7,026321E-07	2808,4	2,73E-05	1,0287E+08	15,40
	KTTH3	0,0717	0,0160	6,23E+01	0,0036	0,015	7,026321E-07	2808,4	3,23E-05	8,6947E+07	12,82

Çizelge A.21 : 54-85 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları.

	Numune Adı	İlk Kütle Kuru (g)	Kalan İnce Malzeme (g)	Kalan Kaba Agregası (g)	Kalan Toplam Malz. (g)	Asitte Kayıp (%)	Bağlayıcı/ Agregası Oranı
Seri 1	KH1	78,26	4,62	43,32	47,94	38,74%	1:1,6
	KH2	56,10	4,18	33,54	37,72	32,76%	1:2
	KH3	54,81	4,30	35,46	39,76	27,46%	1:2,7
Seri 2	KPTTH1	62,74	6,37	35,27	41,64	33,63%	1:2
	KPTTH2	62,02	7,49	37,60	45,09	27,30%	1:2,7
	KPTTH3	77,09	7,23	52,02	59,25	23,14%	1:3,3
Seri 3	KTTH1	70,52	8,64	39,22	47,86	32,13%	1:2
	KTTH2	68,86	7,80	42,46	50,26	27,01%	1:2,7
	KTTH3	84,54	8,78	56,01	64,79	23,36%	1:3,3

Çizelge A.22 : 38-47 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları.

	Numune Adı	İlk Kütle Kuru (g)	Kalan İnce Malzeme (g)	Kalan Kaba Agregası (g)	Kalan Toplam Malz. (g)	Asitte Kayıp (%)	Bağlayıcı/ Agregası Oranı
Seri 1	KH1	44,24	3,35	24,45	27,80	37,16%	1:1,7
	KH2	38,46	3,46	25,41	28,87	24,93%	1:3
	KH3	41,78	3,23	28,23	31,46	24,70%	1:3
Seri 2	KPTTH1	43,45	4,83	24,92	29,75	31,53%	1:2
	KPTTH2	41,90	5,56	25,53	31,09	25,80%	1:2,9
	KPTTH3	46,63	4,27	32,43	36,70	21,30%	1:3,7
Seri 3	KTTH1	40,34	4,19	21,99	26,18	35,10%	1:1,8
	KTTH2	38,71	3,80	24,63	28,43	26,56%	1:2,7
	KTTH3	41,10	3,99	26,98	30,97	24,65%	1:3,1

**Çizelge A.23 : 9-12 g harç numuneleri üzerinde yapılan asit kaybı analiz sonuçları.**

	Numune Adı	İlk Kütle Kuru (g)	Kalan İnce Malzeme (g)	Kalan Kaba Agregası (g)	Kalan Toplam Malz. (g)	Asitte Kayıp (%)	Bağlayıcı/ Agregası Oranı
Seri 1	KH1	10,08	1,32	5,38	6,70	33,53%	1:2
	KH2	11,10	2,02	6,36	8,38	24,50%	1:3
	KH3	10,09	0,94	6,43	7,37	26,96%	1:2,7
Seri 2	KPTTH1	10,16	1,54	6,02	7,56	25,59%	1:2,9
	KPTTH2	9,38	0,80	5,76	6,56	30,06%	1:2,3
	KPTTH3	9,75	0,55	7,07	7,62	21,85%	1:3,6
Seri 3	KTTH1	9,57	1,86	5,42	7,28	23,93%	1:3,1
	KTTH2	10,38	1,88	6,51	8,39	19,17%	1:4,2
	KTTH3	11,13	2,29	7,11	9,40	15,54%	1:5,4

**Çizelge A.24 : 54-85 g harç numunesi elek analizi sonuçları.**

ELEK BOYUTU	ELEKTEN GEÇEN (%)								
	KH 1	KH 2	KH 3	KPTTH 1	KPTTH 2	KPTTH 3	KTTH 1	KTTH 2	KTTH 3
mm									
8,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4,0	74	79	73	67	79	70	71	69	76
2,0	47	53	47	46	53	46	49	46	50
1,0	31	34	30	30	34	34	31	29	31
0,5	17	19	16	17	20	24	17	16	18
0,2	6	7	5	6	8	17	7	6	7
toplama kabı	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Çizelge A.25 : 38-47 g harç numunesi elek analizi sonuçları.**

ELEK BOYUTU	ELEKTEN GEÇEN (%)								
	KH 1	KH 2	KH 3	KPTTH 1	KPTTH 2	KPTTH 3	KTTH 1	KTTH 2	KTTH 3
mm									
8,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4,0	69	71	74	67	74	67	72	62	75
2,0	45	46	51	43	50	41	49	41	56
1,0	29	28	35	28	31	25	31	26	37
0,5	16	16	24	15	17	13	17	15	23
0,2	4	4	13	5	5	4	6	5	11
toplama kabı	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Çizelge A.26 : 9-12 g harç numunesi elek analizi sonuçları.**

ELEK BOYUTU	ELEKTEN GEÇEN (%)								
	KH 1	KH 2	KH 3	KPTTH 1	KPTTH 2	KPTTH 3	KTTH 1	KTTH 2	KTTH 3
mm									
8,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4,0	84	86	72	52	70	47	71	64	66
2,0	47	58	46	33	42	30	46	38	44
1,0	30	33	26	21	23	19	27	24	29
0,5	16	19	14	12	10	12	15	13	16
0,2	5	6	3	4	0	6	6	4	8
toplama kabı	0	0	0	0	0	0	0	0	0



**Çizelge A.27 : 10-15 g harç numuneleri üzerinde yapılan kızdırma kaybı analiz sonuçları.**

	Numune Adı	Wo (g)	W1 (g)	105 °C Kayıp (%)	W2 (g)	550 °C Kayıp (%)	W3 (g)	1100 °C'deki Kayıp (%)	Karbonat Miktarı (%)	Hidrolik Özellik Değeri
Seri 1	KH1	10,47215	10,43746	0,33%	10,20210	2,25%	8,59315	15,42%	35,03%	6,8
	KH2	10,23062	10,19157	0,38%	10,02870	1,60%	8,69122	13,12%	29,83%	8,2
	KH3	11,32616	11,28098	0,40%	11,11457	1,48%	9,89255	10,83%	24,62%	7,3
Seri 2	KPTTH1	13,05665	13,00313	0,41%	12,73706	2,05%	11,37767	10,45%	23,76%	5,1
	KPTTH2	11,98432	11,91638	0,57%	11,64299	2,29%	10,59876	8,76%	19,92%	3,8
	KPTTH3	12,60994	12,54674	0,50%	12,34339	1,62%	11,31711	8,18%	18,59%	5,0
Seri 3	KTTH1	12,51574	12,45488	0,49%	12,15087	2,44%	10,79627	10,88%	24,72%	4,5
	KTTH2	14,22456	14,15397	0,50%	13,83651	2,24%	12,37580	10,32%	23,45%	4,6
	KTTH3	11,91372	11,84773	0,55%	11,62259	1,90%	10,46263	9,79%	22,25%	5,2

**Çizelge A.28 : 4-5 g harç numuneleri üzerinde yapılan kızdırma kaybı analiz sonuçları.**

	Numune Adı	Wo (g)	W1 (g)	105 °C Kayıp (%)	W2 (g)	550 °C Kayıp (%)	W3 (g)	1100 °C Kayıp (%)	Karbonat Miktarı (%)	Hidrolik Özellik Değeri
Seri 1	KH1	4,89868	4,87156	0,55%	4,76164	2,26%	3,99818	15,67%	35,62%	6,9
	KH2	4,73881	4,71054	0,60%	4,63130	1,68%	3,96205	14,21%	32,29%	8,4
	KH3	4,84278	4,81667	0,54%	4,74444	1,50%	4,20372	11,23%	25,51%	7,5
Seri 2	KPTTH1	4,74529	4,71710	0,59%	4,60582	2,36%	4,02585	12,30%	27,94%	5,2
	KPTTH2	4,71660	4,68224	0,73%	4,57789	2,23%	4,16082	8,91%	20,24%	4,0
	KPTTH3	4,81499	4,78532	0,62%	4,71197	1,53%	4,34242	7,72%	17,55%	5,0
Seri 3	KTTH1	4,86352	4,83403	0,61%	4,73386	2,07%	4,28390	9,31%	21,15%	4,5
	KTTH2	4,78676	4,75679	0,63%	4,65167	2,21%	4,15574	10,43%	23,69%	4,7
	KTTH3	4,82403	4,79171	0,67%	4,70415	1,83%	4,23225	9,85%	22,38%	5,4



## EK B



**Şekil B.1 :** Pozzolanik aktivite için ponza taşı tozu ve tuğla tozu ile üretilmiş kireç harcı örnekleri.



**Şekil B.2 :** 4x4x16cm lik prizmatik kalıplara dökülen harç numuneleri.



Şekil B.3 : Buhar geçirgenlik deneyi için desikatörde bekletilen numuneler.



Şekil B.4 : Kılcallık deneyi.



**Şekil B.5 :** Su emme deneyi.



**Şekil B.6 :** Asit kaybı analizinde beherde asit ile reaksiyona giren harç numuneleri.



**Şekil B.7 :** Asitte çözme işleminden sonra etüvde kurumaya bırakılan filtrelenen ve beherde kalan çözünmeyen kısım.



**Şekil B.8 :** Asit kaybı analizi sonrası asitte çözünmeyen kısmın elek analizi.



**Şekil B.9 :** Kızdırma kaybı analizinde kröze içerisine konulmuş öğütülmüş harç numuneleri.





## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Ülkü Aylın MAVİOĞLU

**Doğum Yeri ve Tarihi:** UŞAK / 10.08.1984

**Adres:** Vişnezade Mah. Kireçhane Sok. No:5/4 Beşiktaş/İstanbul

**Lisans Üniversitesi:** İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü