

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

**5.2 DERS: Tarihi Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi
Uygulamadan Örnekler**

Prof. Dr. Nabi YÜZER
Yrd. Doç. Dr. Dilek EKŞİ AKBULUT

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

1. Tarihi Yapılarda Yerinde Uygulanan Deneyler ve Numune Alınması

- Elemanlarda Yüzey Sıcaklığı ve Nemin Araştırılması
- Sertlik ve Ölçümü
- Ultrases
- Radyoaktif Metodlar
- Infrared Tomografi Yöntemi
- Yerinde Basınç Deneyi
- Yerinde Kayma Deneyi

2. Laboratuar Çalışması

- Mekanik Deneyler
- Fiziksel Deneyler
 - Birim hacim ağırlık
 - Özgül ağırlık
 - Porozite
 - Kompasite
 - Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme
 - Kılcal Su Emme (Kapilarite)
 - Renk Ölçümü

3. Kimyasal Deneyler

4. İç Yapı Analizleri

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Yerinde Yapılan Çalışmalar

- Elemanlarda Yüzey Sıcaklığı ve Nemin Araştırılması



Fotoğraf 1. Yüzey sıcaklığı ve yüzey bağıl neminin ölçümü

Çizelge 1. Fatih Camii ve Külliyesi'nde yapılan ölçümler sırasında yüzeylerin ve ortamın sıcaklık ve nem durumu

Blok	Malzeme		Ortam Koşulları	
	Ortalama Yüzey Sıcaklığı (°C)	Ortalama Yüzey Nemi (%)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Bağıl Nem (%)
Camii	27	15	24	66
Avlu	26	15		
Akdeniz Medresesi	27	30		
Karadeniz Medresesi	26	16		
Sübyan Mektebi	24	17		

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤Yüzey Sertliği ve Ultrases Geçiş Hızı



Deneye hazırlanan bölgede 12 vuruş yapılır ve ortalama değer (R_{ort}) hesaplanır.

Fotoğraf 2 (a,b). Yüzey sertliği ölçümü

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Ultrases Geçiş Hızı



Fotoğraf 3. Ultrases geçiş hızının belirlenmesi

Örnek: Doğal taş E1a

Problar arası mesafe 130 mm

Ses geçiş süresi 53,6 μ s

Ses geçiş hızı:

$$V = \frac{130}{53,6} = 2,425 \text{ mm}/\mu\text{s} \text{ (km/s)}$$

$$V = \frac{l}{t}$$

V: Ultrases geçiş hızı (mm/ μ s)

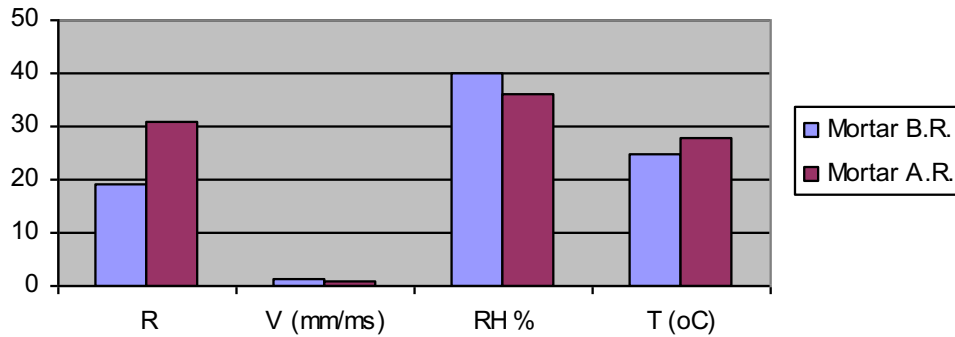
l: Problar arası mesafe (mm)

t: Ultrases geçiş süresi (μ s)

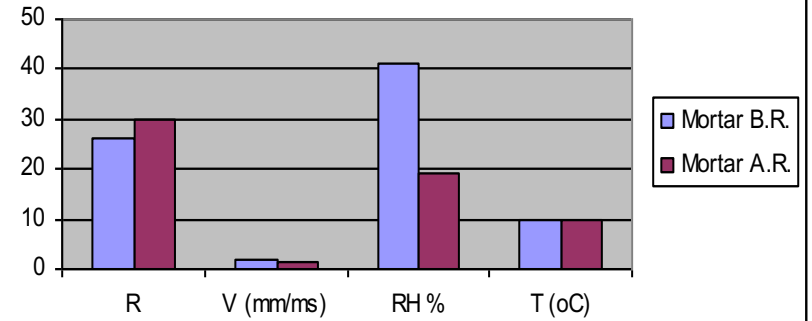
Çizelge 2. Tahribatsız Ölçüm Sonuçları (Ohrid/Makedonya)

Yapı Adı	Malzeme	Eleman Kodu	R _{ort}	V _{ort} (mm/ μ s)
Saint Peter ve Pavel Kilisesi	Doğal Taş	E1a	81	2,425
		D1-2 (K12)	75	2,527
		CD1a	86	2,866
		CD1b	95	2,316
		B2-3	86	1,992
		A3-4	50	1,160
		B4-5 (K11)	66	2,486
		CD6a	70	3,215
		CD6b	86	2,451
		D5-6 (K10)	92	2,275
		DE5	83	2,434
	Tuğla	T1	68	1,145
		T2	72	0,728
		T3	71	1,168
		T4	78	1,883

**Non-Destructive Test Results in Mortar
Before and After Restoration in Summer**



**Non-Destructive Test Results in Mortar
Before and After Restoration in Winter**



Zeyrek Camii taşıyıcı malzemelerinde yüzey sıcaklığı ve yüzey nemi değerlerinin restorasyon öncesi ve sonrası değerleri

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Yapıdan Numune Alınması



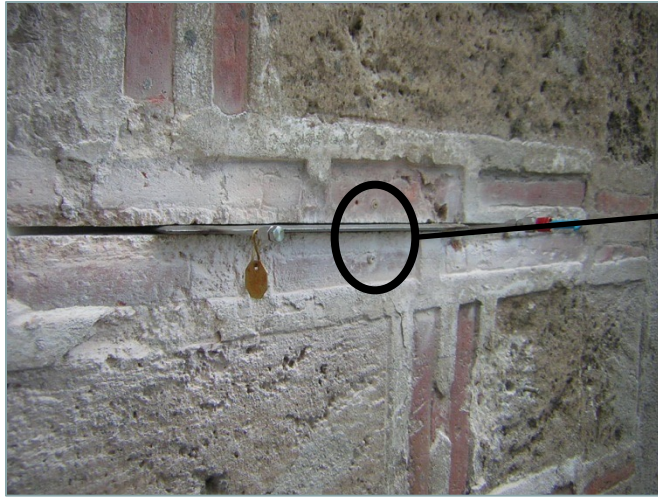
Fotoğraf 4. Yapıdan karot alınması ve çıkarılan numune



Fotoğraf 5. Çatıdan tuğla numune alınışı
(Çifte Minareli Medrese, Erzurum)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Yerinde Basınç Gerilmesi ve Elastisite Modülünün Belirlenmesi



Fotoğraf 6. Flat-Jack ile basınç gerilmesinin belirlenmesi (Mustafa Paşa Camii/Üsküp)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤Yerinde Basınç Gerilmesinin Belirlenmesi

Örnek:

Tarihi bir yapıda yapılan Flat Jack uygulaması sonuçları aşağıda verilmiştir. Bu değerlerden faydalanarak deney bölgesindeki basınç gerilmesini hesaplayınız. ($K_m=0,53$, $K_a=1,16$, $h=1,20m$)

$l_0=4,3455$ cm (pimler arası mesafe)

$l_1=4,3211$ cm	$P_1=210$ PSI
$l_2=4,3243$ cm	$P_2=240$ PSI
$l_3=4,3324$ cm	$P_3=310$ PSI
$l_4=4,3344$ cm	$P_4=330$ PSI
$l_5=4,3359$ cm	$P_5=350$ PSI
$l_6=4,3372$ cm	$P_6=370$ PSI
$l_7=4,3389$ cm	$P_7=400$ PSI
$l_8=4,3397$ cm	$P_8=420$ PSI
$l_9=4,3405$ cm	$P_9=440$ PSI
$l_{10}=4,3422$ cm	$P_{10}=460$ PSI
$l_{11}=4,3433$ cm	$P_{11}=480$ PSI
$l_{12}=4,3449$ cm	$P_{12}=500$ PSI
$l_{13}=4,3455$ cm	$P_{13}=510$ PSI

$$P_{13} = 510 \text{ PSI} = 3,5 \text{ MPa}$$

$$f = K_m \cdot K_a \cdot P = 3,5 \cdot 0,53 \cdot 1,16 = 2,1 \text{ MPa}$$

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤Elastisite Modülü ve Poisson Oranının Belirlenmesi

Örnek:

Model duvarda yapılan ikili Flat Jack uygulamasında, iki düşey bir yatay LVDT ile ölçülen boy değişimleri sonucunda Elastisite modülü ve Poisson Oranı belirlenmiştir.

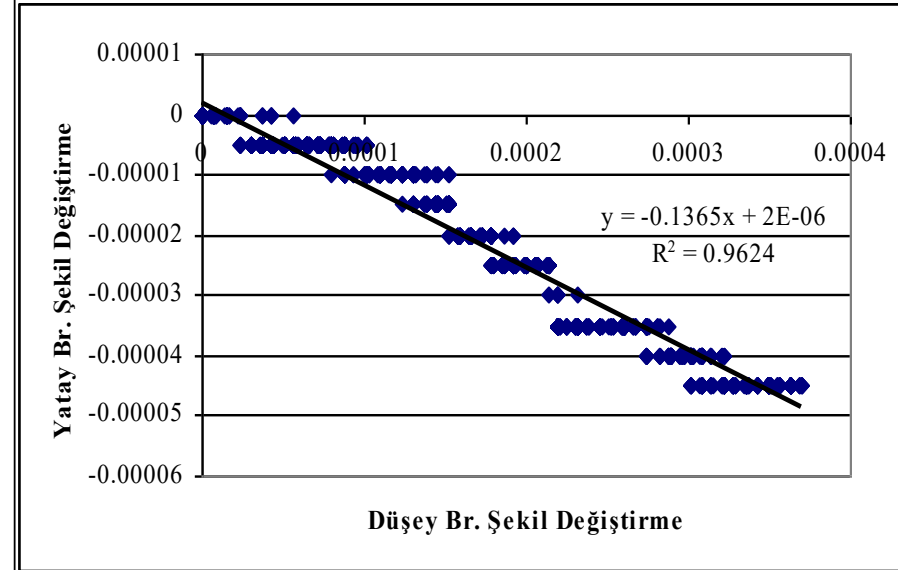
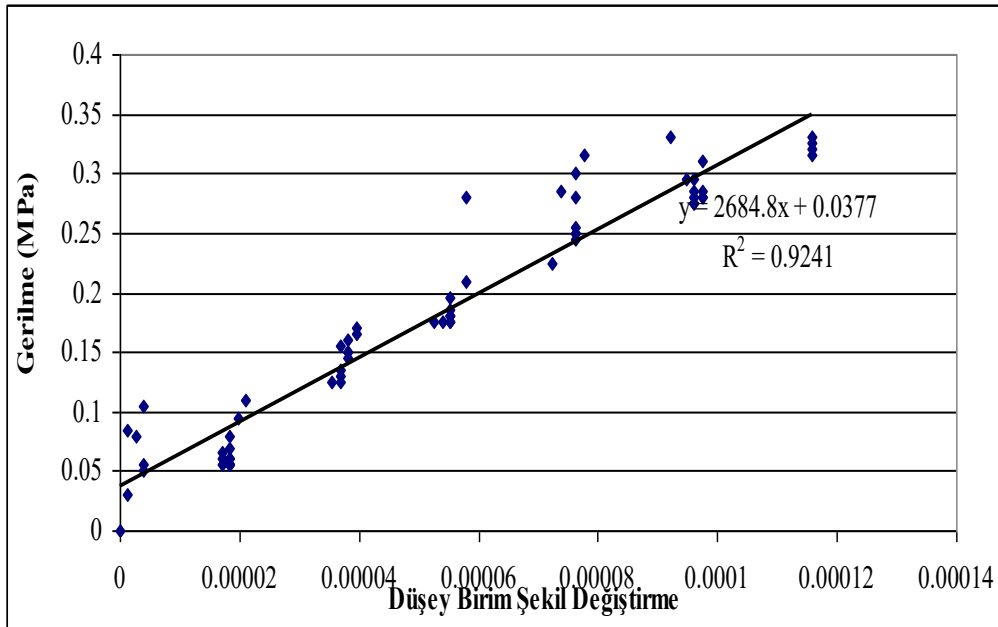


TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Elastisite Modülü ve Poisson Oranının Belirlenmesi

Örnek:

Model duvarda yapılan ikili Flat Jack uygulaması sonuçları aşağıda verilmiştir. Deney sonucunda Elastisite modülü: 2685 Mpa, Poisson Oranı: 0,14 olarak bulunmuştur.



$$\tau_0 = \tau - \mu \times \sigma_v$$

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤Yerinde Kayma Gerilmesinin Belirlenmesi



Fotoğraf 7. Yük altında kayma deneyi (Süleymaniye Doğum Evi)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤Yerinde Kayma Gerilmesinin Belirlenmesi

Deney yapılan bölgedeki kayma dayanımı indeksi (τ , N/mm²), tuğlayı kaydıran maksimum yatay kuvvetin tuğlanın harç ile temas eden alt ve üst yüzeylerindeki alanların toplamına oranlanması ile belirlenmiştir. Deneyden elde edilen kayma indeksi (τ , N/mm²), deney yapılan bölgedeki normal gerilmeden dolayı azaltılarak aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\tau_0 = \tau - \mu \times \sigma_v$$

Denklemden τ_0 düşey yöndeki eksenel yükün “0” olması durumundaki kayma indeksini, μ yığma elemandaki sürtünme katsayısını, σ_v ise deney bölgesindeki tahmini normal gerilmeyi ifade etmektedir. Deney sonuçları Çizelge 'de verilmiştir.

Kat	No	Kayma indeksi (τ_0 , N/mm ²)
Zemin	1	0,37
	2	1,08
1. Normal	3	0,19

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Laboratuvarda Yapılan Çalışmalar

➤ Basınç Deneyi



Fotoğraf 8: Tek eksenli basınç deneyi

Örnek (Karot no 2):

Kırma yükü 32,5 kN

Karot çapı 53 mm

Basınç dayanımı:

$$A = \frac{\pi \cdot 53^2}{4} = 2206,2 \text{ mm}^2$$

$$f_b = \frac{32,5 \times 1000}{2206,2} = 14,7 \text{ MPa}$$

$$f_b = P_k / A$$

f_b : Basınç dayanımı (N/mm^2)

P_k : Kırma yükü (N)

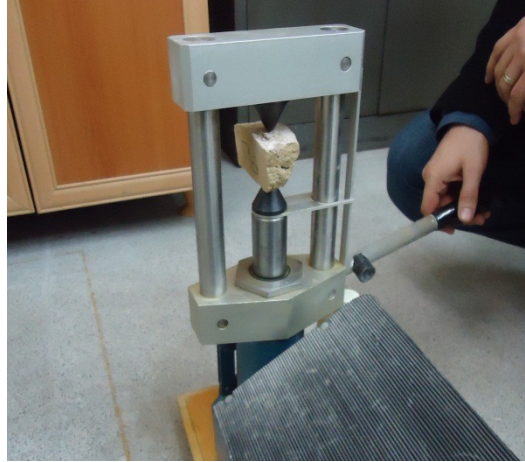
A : Alan (mm^2)

Çizelge 5. Doğal taş örneklerinde yapılan basınç deneyi sonuçları
(Çifte Minareli Medrese/Erzurum)

Mahal		Karot No	Kayaç	P _k (kN)	f _k (N/mm ²)
Medrese	İç Avlu	2	Bazaltik Andezit	32,5	14,7
		3		44,8	20,3
		5		52,9	24,0
		18		49,6	22,5
	Dış Duvarlar	1	Bazaltik Andezit	34,4	15,6
		2		36,9	16,7
		11		40,4	18,3
	İç Avlu	10	Camsı Tüf (Vitrik Tüf)	37,6	17,0
	Türbe Kaplamasından		16	Mermer	125,9

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤Nokta Yükleme Deneyi



Fotoğraf 9. Nokta yükleme deneyi

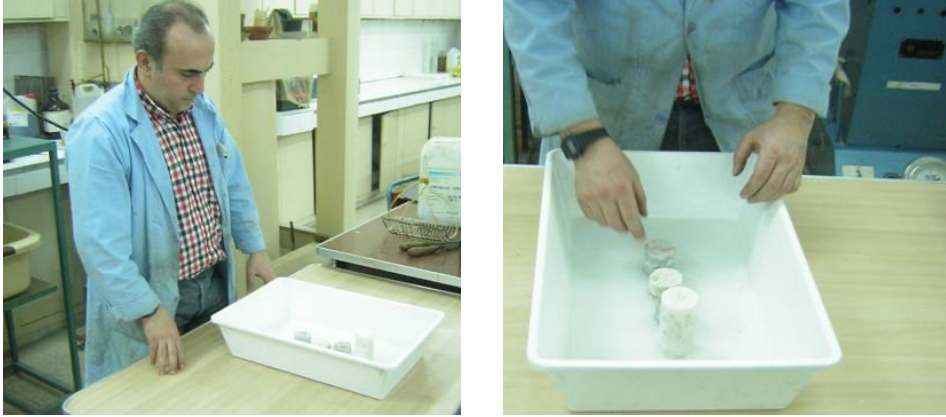
Tarihi yapılardan alınan bazı malzemeler çok zayıf oldukları için bu malzemelerde tek eksenli basınç dayanımı testi yapmak zordur. Bu nedenle nokta yükleme metodu ile basınç dayanımları ölçülür.

Örnek:

Malzeme		Dayanım (N/mm ²)
Taş	Dolomitik Kireç Taşı	169,7
	Kireç Taşı (Killi)	40,8
	Silisli Kum Taşı	96,1
Tuğla		10,3
Harç		2,3
Sıva		2,0

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Fiziksel Deneyler



Fotoğraf 10. Fiziksel deneyler (su emme deneyleri)

- $\beta = W_0 / (W_{SH} - W_{SS})$
- $\gamma = W_{toz} / V_{toz}$
- $k = \beta / \gamma$; $p = 1 - k$
- $a_s = (W_{SH} - W_0) / W_0$
- $h_s = (W_{SH} - W_0) / (W_{SH} - W_{SS})$
- $K = Q^2 / (F^2 \times t)$
- $D_d = h_s / p$

β : Birim ağırlık (g/cm^3)

γ : Özgül ağırlık (g/cm^3)

k : Kompozite (%)

p : Porozite (%)

W_0 : Kuru ağırlık (g)

W_{SH} : Suya doymun havadaki ağırlık(g)

W_{SS} : Suya doymun sudaki ağırlık(g)

a_s : Ağırlıkça su emme (%)

h_s : Hacimce su emme (%)

K : Kılcal su emme ks (cm^2/s)

Q : Emilen su miktarı (g)

F : Su ile temas eden yüzey alanı (cm^2)

t : Zaman (s)

D_d : Doyma derecesi (%)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Fiziksel Deneyler

Örnek:

Erzurum Çifte Minareli Medrese'den alınan doğal taş numunesinde yapılan deney sonuçları aşağıda verilmiştir. Deney sonuçlarından yararlanarak bu malzemenin birim ağırlığını, özgül ağırlığını, kompasitesini, porozitesini, ağırlıkça ve hacimce su emmelerini, kılcal su emme katsayısını ve doyma derecesini hesaplayınız. Bu malzemenin donma-çözülme etkisine dayanıklılığını kontrol ediniz.

Deney Sonuçları:

$$W_0 = 181,4 \text{ g} \quad W_{SH} = 191,8 \text{ g} \quad W_{SS} = 80,8 \text{ g} \quad W_{toz} = 50 \text{ g} \quad V_{toz} = 20,8 \text{ cm}^3$$

Kılcal su emme deneyi:

F (cm ²)	W ₁	W ₄	W ₉	W ₁₆	W ₂₅	W ₃₆	W ₄₉	W ₆₄
22	183,2	184,1	184,7	185	185,5	185,9	186,2	186,4

Hesaplar:

- ✓ Birim ağırlık : $\beta = 181,4 / (191,8 - 80,8) = 1,6 \text{ g/cm}^3$
- ✓ Özgül ağırlık : $\gamma = 50 / 20,8 = 2,4 \text{ g/cm}^3$
- ✓ Kompasite : $k = 1,6 / 2,4 = 0,66 \text{ (%66)}$
- ✓ Porozite : $p = 1 - 0,66 = 0,34 \text{ (%34)}$

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

✓ Ağırlıkça su emme : $a_s = \frac{191,8-181,4}{181,4} = 0,057$ (%5,7)

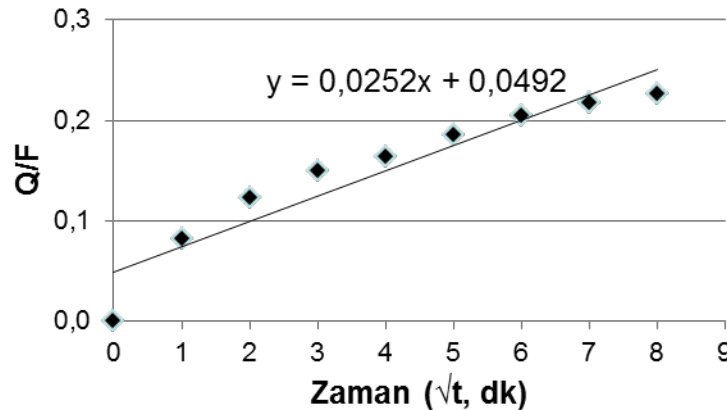
✓ Hacimce su emme : $h_s = \frac{191,8-181,4}{191,8-80,8} = 0,094$ (%9,4)

✓ Kılcal su emme :

F (cm ²)	W ₁	W ₄	W ₉	W ₁₆	W ₂₅	W ₃₆	W ₄₉	W ₆₄
22	183,2	184,1	184,7	185	185,5	185,9	186,2	186,4

 $Q_i = W_i - W_0$

Q ₀	Q ₁	Q ₄	Q ₉	Q ₁₆	Q ₂₅	Q ₃₆	Q ₄₉	Q ₆₄
0	1,8	2,7	3,3	3,6	4,1	4,5	4,8	5,0



$$m = \frac{Q}{F\sqrt{t}} \rightarrow m^2 = \frac{Q^2}{F^2 \cdot t}$$

$$K = m^2 / 60 = 0,0252^2 / 60 \rightarrow K = 1,06 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{s}$$

✓ Doyma derecesi : $D_d = \frac{0,094}{0,34} = 0,28$ (%28)

✓ Doyma derecesi (D_d) < %80 olduğundan donma-çözülme etkisine dayanıklıdır.

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Fiziksel Deneyler

Kuruma Hızı:

Taş, tuğla, harç ve sıvadan yeterli sayıda numune alınarak suya doygun yüzey kuru hale getirilmiştir. Bu numuneler 20±2°C sıcaklık ve %50±5 bağıl neme sahip ortamda bekletilmiş, belirli zaman aralıklarında tartılmıştır. Bu değerlerden faydalanarak kuruma hızı hesaplanmış, kuruma hızı-zaman ilişkisi Şekil 1’de verilmiştir.

Zaman (h)	Tuğla		Doğal taş		Harç		Sıva	
	W (g)	Hız (%)	W (g)	Hız (%)	W (g)	Hız (%)	W (g)	Hız (%)
0	66,5	29,6	137,5	11,1	38,8	24,8	32	38,5
1	65,8	28,3	136,4	10,2	38,4	23,5	31,4	35,9
2	64,8	26,3	135,1	9,1	37,8	21,5	30,9	33,8
3	63,7	24,2	133,8	8,1	37,3	19,9	30,3	31,2
4	63	22,8	132,9	7,4	37	19,0	29,9	29,4
5	62,1	21,1	131,9	6,5	32,1	17,4	29,5	27,7
24	54,5	6,2	124,7	0,7	31,6	3,2	26,9	16,5
48	53,4	4,1	124,0	0,2	31,5	1,6	26,5	14,7
72	52,9	3,1	124,0	0,2	31,5	1,3	26,5	14,7
96	52,6	2,5	123,9	0,1	31,5	1,3	26,5	14,7
120	52,5	2,3	123,9	0,1	31,5	1,3	26,5	14,7
144	52,4	2,1	123,9	0,1	31,4	1,0	26,4	14,3

Kuru ağırlıklar

Doğal taş : 123,8 g

Tuğla : 51,3 g

Harç : 31,1 g

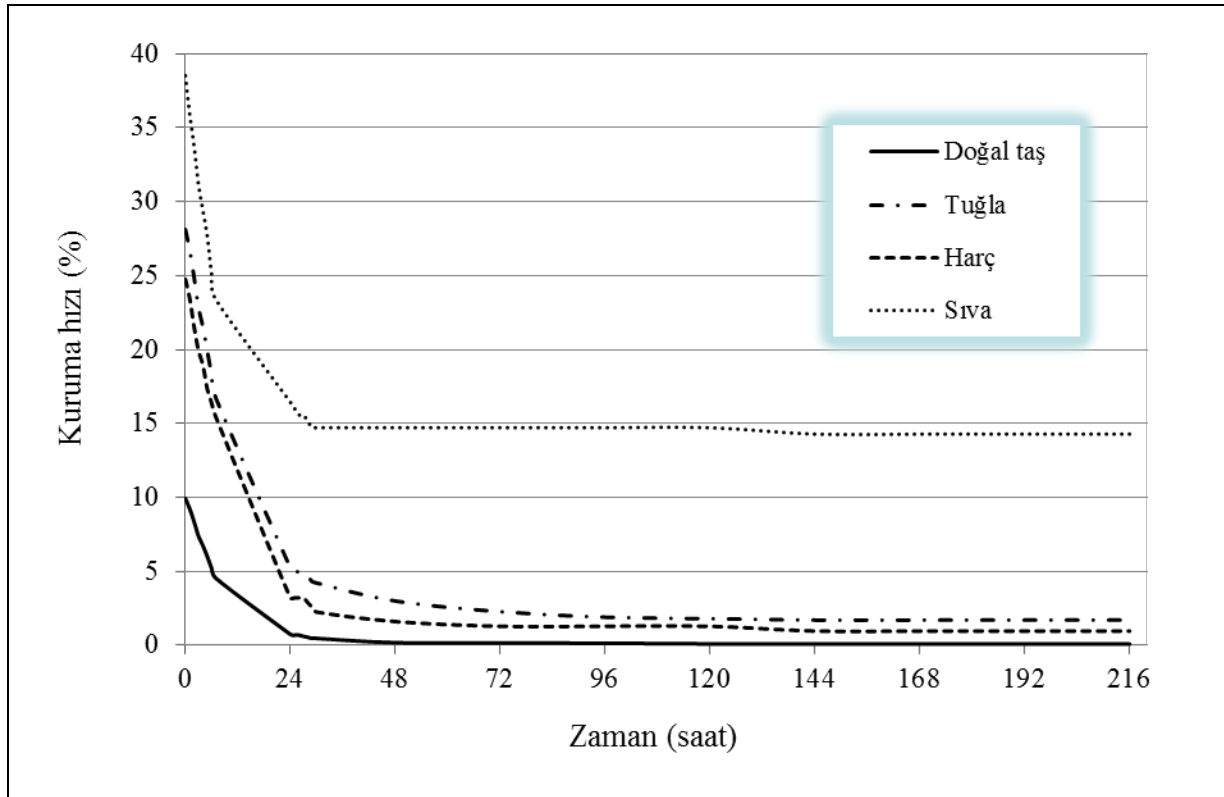
Sıva : 23,1 g

$$Hız (\%) = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100$$

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Fiziksel Deneyler

Kuruma Hızı:



TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Kimyasal Deneyler

Nem oranı, kızdırma kaybı ve karbonat miktarı

Tüm bu özelliklerin belirlenmesi amacı ile deney numuneleri;

- 2 saat 105°C'ta tutulur,
- 1 saat 550°C'ta tutulur,
- 0,5 saat 1050°C'ta tutulur,
- Oda sıcaklığına kadar desikatörde soğutulur,
- Ağırlıklar tartılarak sırası ile W_1 , W_2 ve W_3 belirlenir;



Fotoğraf 11. 1050°C'deki fırın

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Kimyasal Deneyler

Örnek:

İlk ağırlığı 30 g olan harç numunesi, iki saat süre ile 105°C'de, bir saat 550°C'de, yarım saat 1050°C'de tutulmuş, her sıcaklık etkisi sonrası ağırlığı sırası ile 28,9 g (W_1), 26,0 g (W_2) ve 22,8 g (W_3) olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre bu harcın nem oranı, kızdırma kaybı ve karbonatlaşma oranını belirleyiniz.

- ✓ Nem oranı
$$:\%H = \frac{30-28,9}{28,9} \times 100 = 3,8$$
- ✓ Kızdırma kaybı (550°C)
$$:\%KK_1 = \frac{28,9-26,0}{28,9} \times 100 = 10,0$$
- ✓ Kızdırma kaybı (1050°C)
$$:\%KK_2 = \frac{26,0-22,8}{28,9} \times 100 = 11,1$$
- ✓ Karbonat oranı
$$:\%KM = \frac{26,0-22,8}{28,9} \times \frac{100}{44} \times 100 = 25,2$$

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Kimyasal Deneyler

Asit kaybı

Örnek:

Harç örneğinden çıkarılan ve kuru ağırlığı 50 g olan toz numune, %10 oranında seyreltilmiş HCl asit ile 60 dakika karıştırılmış, filtre kâğıdından süzülerek kalan malzeme tartılmıştır. Deney sonunda malzemenin kuru ağırlığı 40 g olduğuna göre asitteki kayıp oranını ve bağlayıcı:agrega oranını belirleyiniz.

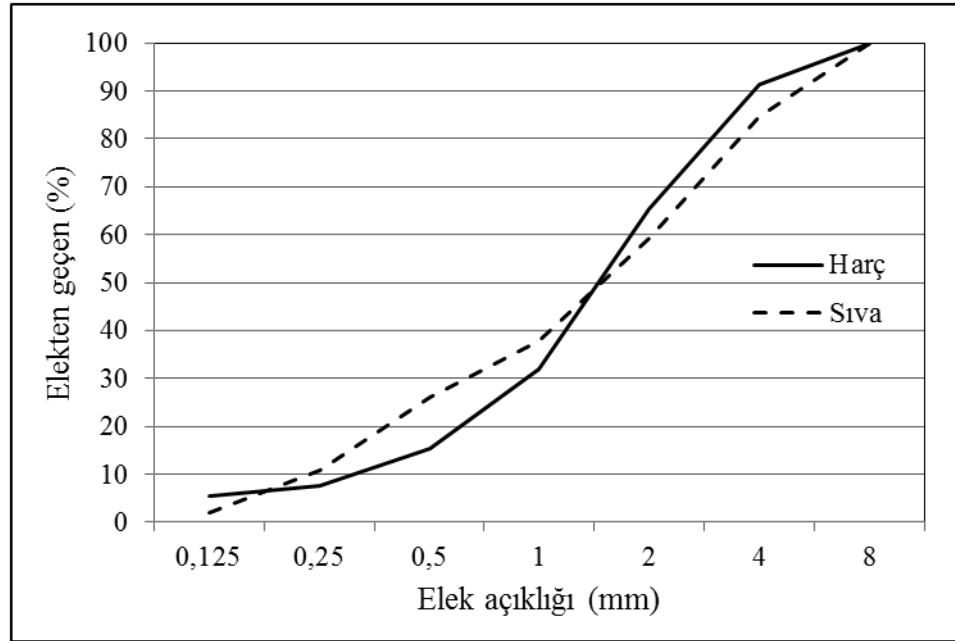


Fotoğraf 12. Asit kaybı

- ✓ Asit kaybı : $\frac{50-40}{50} \times 100 = \%20$
- ✓ Bağlayıcı:agrega oranı : $Bağlayıcı\ miktarı = 50 - 40 = 10\ g, Agreg a\ miktarı = 40\ g$
 $Bağlayıcı:agrega = 1:4$

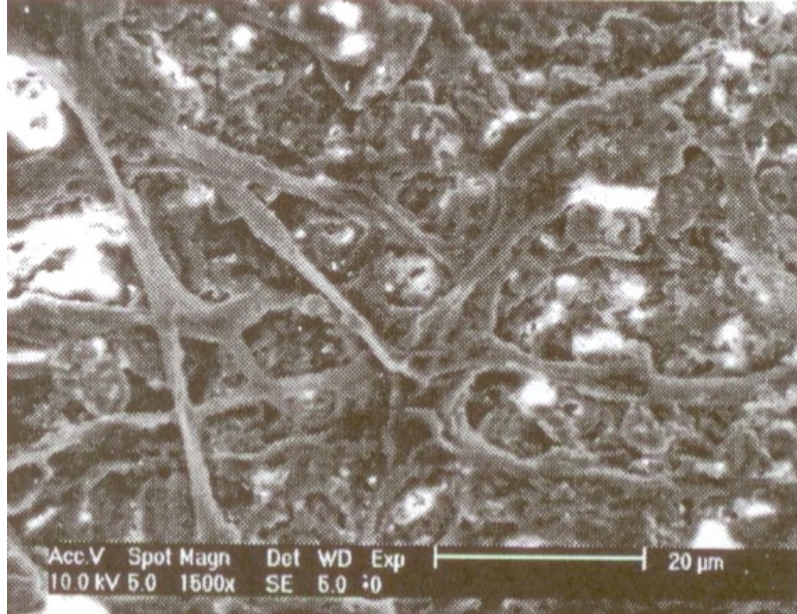
TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Elek analizi (Granülometri):

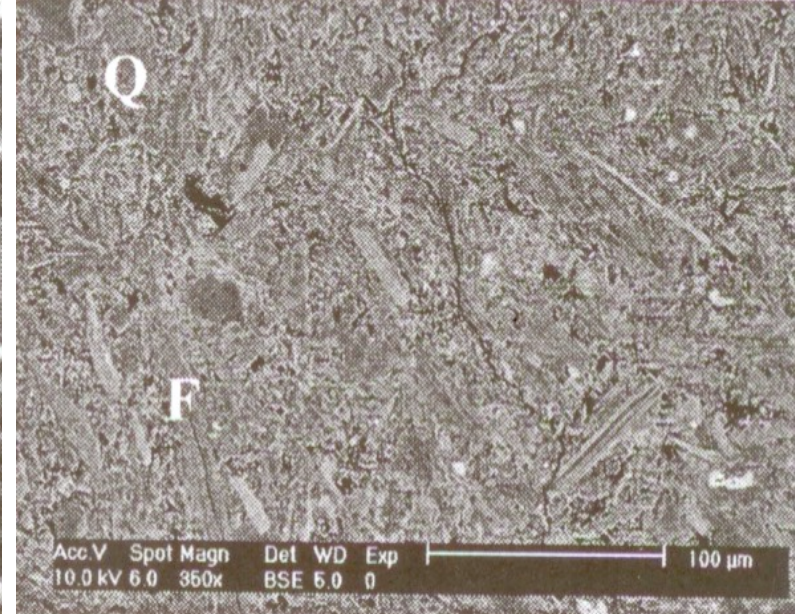


TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤İç Yapı Analizi



(a)



(b)

SEM Görüntüleri (Kılıç vd.,2004)

- (a) Horasan harcında tuğla-harç arayüzeyindeki ağ şeklindeki yapı (Kalsiyum, silisyum ve alüminyumdan oluşmuştur)
- (b) Horasan harcı içindeki tuğla matris (Q:Kuvars, F:Feldspat)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

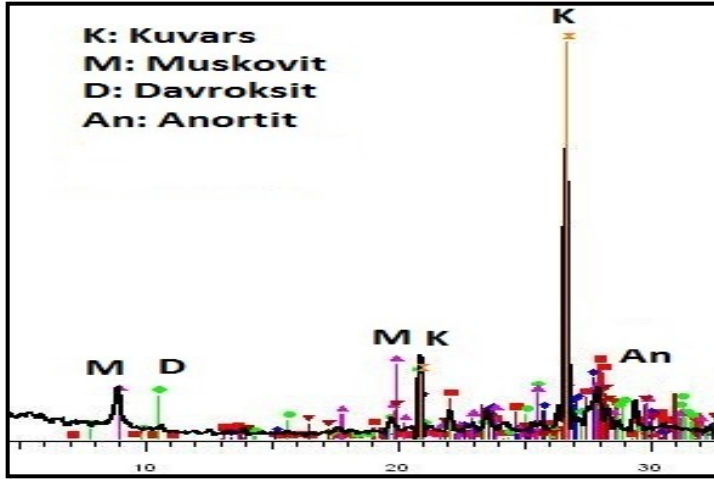
➤ Kimyasal Bileşenlerin Analizi

ELEMENT	HARÇ (%)	ARAYÜZEY (%)	TUĞLA (%)
Ca	67,87	67,90	17,32
Si	9,77	15,36	39,46
Al	10,56	4,08	24,80
Fe	8,38	7,19	12,36
Mg	3,42	5,46	6,06

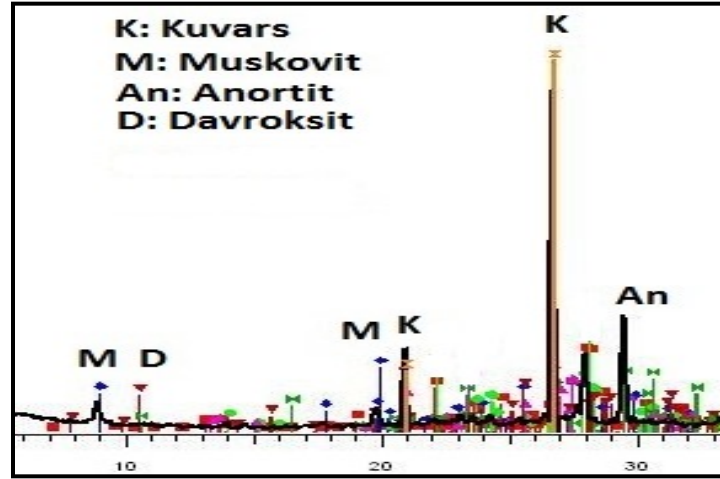
Çizelge 6. Harç, tuğla-harç arayüzeyi ve tuğla kırığı örneklerin EDS analizi sonucu belirlenen kimyasal kompozisyonu (Kılıç vd.,2004)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤Mineralojik Analiz



(a)



(b)

Tarihi bir yapıdan alınan a) tuğlanın ve b) horasan harcı içerisindeki tuğla agreganın XRD sonuçları (Yüzer vd., 2011)

Kuvars (SiO_2),

Anortit [$\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$],

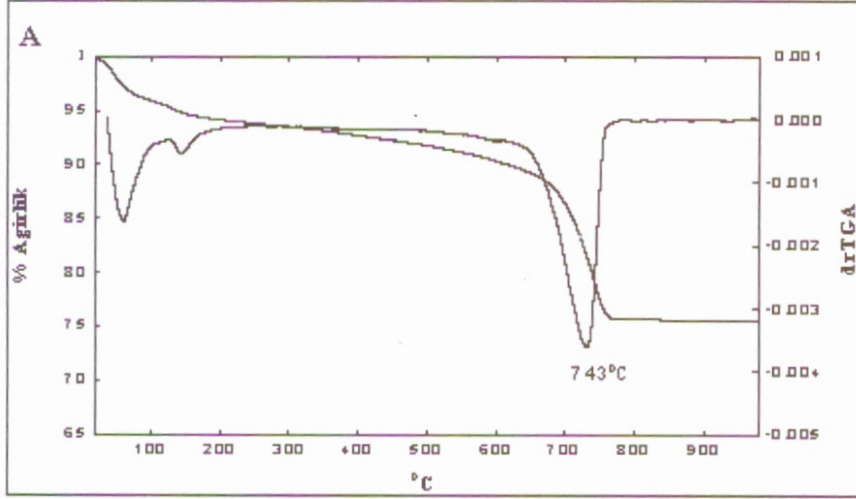
Muskovit [$\text{K}(\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_9(\text{OH})_3)$],

Davroksit [$\text{MnAl}_6\text{Si}_4\text{O}_{17}(\text{OH})_2$]

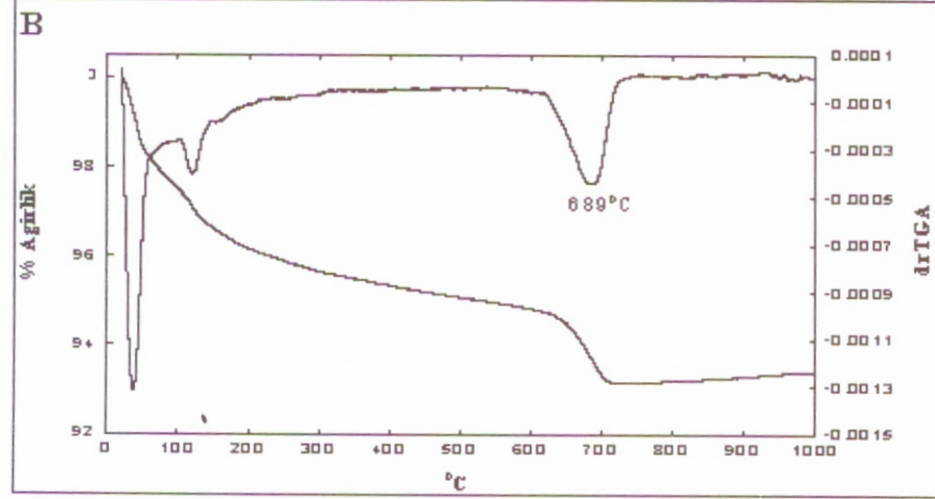
$850^\circ\text{C} < \text{Pişirilme Sıcaklığı} < 900^\circ\text{C}$

Kristobalit ve mullit gibi yüksek sıcaklık minerallerinin oluşmaması, tuğlanın pişirme sıcaklığının 900°C 'yi aşmadığını, anortit mineralinin oluşumu ise bu sıcaklığın 850°C 'nin üzerinde olduğunu göstermektedir.

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



A



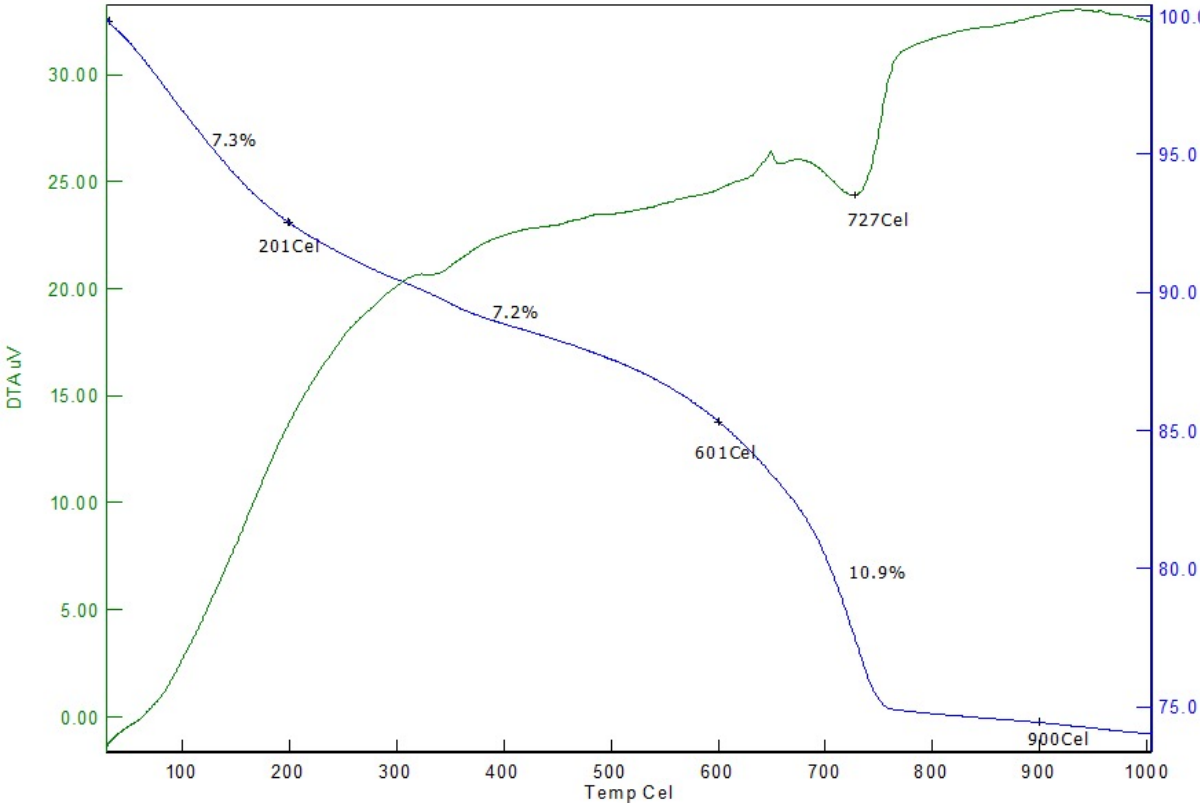
B

TGA Analiz sonuçlarına göre ağırlıkça % azalma (Kılıç vd.,2004)

- A) Horasan harcı (200-600°C'de bağlı suyun uzaklaşması)
(600-900°C'de kalkerdeki CO₂ çıkışı)
- B) Horasan harcı içindeki tuğla matris
(100°C'de adsorbe suyun uzaklaşması)
(689°C'de kil minerallerinin dehidroksilasyonu)

Bu sıcaklık tuğlanın pişirilme sıcaklığı hakkında fikir verir.

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



Şekil 25: Harcın TGA Analiz sonuçlarına göre ağırlıkça % azalma (Yüzer vd.,2011)

200-600°C aralığındaki ağırlık kaybı, kimyasal bağlı suyun (H_2O) çıkışını; 600-900°C aralığındaki ağırlık kaybı ise karbonatlaşmış kirecin kalsinasyonu sonucu karbondioksit (CO_2) çıkışını ifade etmektedir. Harçların hidrolik özellikleri, kayıp karbondioksit ve su yüzdelerinin birbirine oranlanması (CO_2/H_2O) ile değerlendirilir. Bu oranın 1 ile 10 arasında olması durumunda harçların hidrolik özellik gösterdiği, 10 ile 35 arasında olması durumunda ise hidrolik özellik göstermediği kabul edilmektedir [Sağın ve Böke 2010].

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤Puzolanik Aktivite

✓ Horasan harç ve sıvalarında kullanılan tuğla agregaların puzolanik aktiviteleri, 53µm'den küçük boyutlu tuğla agregaların doygun Ca(OH)_2 ile girdikleri reaksiyonun elektrik iletkenliği ölçümü ile belirlenebilmektedir.

Doygun Ca(OH)_2 çözeltisinin elektrik iletkenliği ile bu çözeltinin tuğla tozları ile reaksiyona girmesinden sonra ölçülen elektrik iletkenliği arasındaki fark 1,2 mS/cm'den büyük ise tuğla tozları puzolanik kabul edilirler (Luxan et al., 1989).

Sağın ve Böke yaptıkları bir çalışmada (2010):

Roma dönemi tuğla agregalarının neden olduğu elektrik iletkenliği farkını 3,3-5,6 mS/cm arasında;

Osmanlı dönemi tuğla agregalarının neden olduğu elektrik iletkenliği farkını 1,6-7,3 mS/cm arasında belirlemişlerdir. Buna göre, bu tuğla agregaların kil oranları yüksek hammadde kaynakları kullanılarak hazırlandıkları sonucuna varılmıştır.