

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

5. DERS Tarihi Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

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

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

KORUMA VE ONARIMDA MALZEME

Bu çalışmalarda yapının mevcut durumunun belirlenmesi için; bölgesel yerleşmenin ve yapılaşmanın etkileri, yapının taşıyıcı sisteminin ve malzeme özelliklerinin, yapının geçirdiği onarım, güçlendirme ve/veya eklentilerinin durumunun ve bunların taşıyıcı sisteme etkilerinin araştırılması, yapının bulunduğu bölgenin makro ve mikro ölçekte zemin yapısının ve özelliklerinin incelenmesi gerekir.

Restorasyon çalışmalarında, özgün malzeme özellikleri deneysel olarak belirlenmeli, yeni kullanılacak malzemelerin bu özelliklere sahip olmasına özen gösterilmelidir. Aksi halde tarihi yapılarımıza geri dönüşü mümkün olmayan zararlar verilebilir ve onların sahip olduğu estetik ve tarihi belge değerleri yok olabilir.

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

KORUMA VE ONARIMDA MALZEME

Günümüzde bir tarihi yapıda koruma-onarım yapılmak istendiğinde

yapının mimari ölçümleri ve detaylarını belgelendiren rölöve bugünkü durumunun değerlendirilerek var olan kayıp kısımlarının ya da olası eklentilerinin belirlenerek, özgün halinin saptanması olan restitüsyon, yeni kullanım biçiminin belirlenmesi olan restorasyon projesi

Özgün malzeme özelliklerinin ve onarım malzemelerinin belirlenmesi ise sıradan bir rapordan öteye gitmemektedir.

Oysa doğru bir onarım, ön araştırmalardan laboratuvar analizlerine kadar mimar, malzeme kimyacısı, inşaat mühendisi, sanat tarihçisi, jeolog gibi uzmanlar grubunca bilimsel araştırma ve malzeme çalışması ile mümkündür.

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

YAPI İLE İLGİLİ ÇALIŞMA PLANI		
I	Yapı Kimliğinin Tespiti	Adı / Orjinal Adı
		Adresi
		İşlevi; Orjinal işlevi / Günümüzdeki İşlevi
		Mimar / Yaptıran Kişi veya Kuruluş
		Yapım Yılı / Dönemi
		Şu Andaki Durumu
		Yapının Geçmişi (onarım, yenileme, eklenti)
II	Yapıya Ait Doküman Elde Edilmesi	a) Literatür ve görsel bilgi edinilmesi
		b) Plan, kesit, görünüş, fotoğraf elde edilmesi
		c) İnceleme ve tespitler için gerekli kurum ve kuruluşlardan gerekli iznin alınması
		d) Çalışma için ilgili(sorumlu) kişi ile ilişki kurulması
		e) Rölöve projesi elde edilemez ise rölöve çıkarılması
III	Yapıda Tespit Çalışması	a) II adımda elde edilen bilgiler ışığında yapının planında, kesitinde, görünüşünde elemanların adlandırılması, numaralandırılması
		b) Elde edilen veya oluşturulan dokümanlar ile yapının yerinde karşılaştırılması bir önceki adımda yapılan çalışmanın yerinde denetlenmesi, karşılaştırılması
		c) Elemanların son durumunun gözlem ve fotoğraf yolu ile incelenmesi var ise hasar tespiti
		d) Son durumun elde edilen bilgiler ile karşılaştırılması
		e) III a çalışmasından yararlanılarak yapılacak gözlem, ölçüm ve deneyler için çalışma tablosu oluşturulması
		f) Her bir elemanda kullanılan malzemelerin tespit edilmesi, görünen boyutları ölçülmesi, çatlak ve hasarların belirlenmesi, gerekli yerlerden detay fotoğrafları alınması
		g) Yerinde tahribatsız ölçümler yapılması ve e adımı hazırlanmış olan tablolara işlenmesi
		h) Gerekli olan ve izin alınabilen bölgelerden numune alınması
IV	Laboratuar Çalışması	a) Yapıdan alınacak örnek ve numunelerin deneye hazırlanması
		b) Fiziksel deneyler
		c) Mekanik deneyler
		d) Laboratuar sonuçları ile yerinde yapılan ölçümler arasında istatistiksel ilişki araştırılması, bağıntı elde edilmesi
		e) Elde edilen istatistiksel bağıntılar kullanılarak numune alınamayan ancak tahribatsız ölçüm yapılan elemanlara ait malzeme özelliklerinin hesaplanması / belirlenmesi
V	Malzeme Seçimi	a) Onarım ve / veya güçlendirme için gerekli olan malzemelerin önerilmesi amacı ile deneysel çalışma yapılması, yapıya uygun olan malzemelerin seçilmesi
		b) Yapıda uygulanan malzemelerin yapım aşamasında yerinden numune alınarak kontrol edilmesi, orjinaline uygunluğu denetlenmesi

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Her türlü yapıda olduğu gibi restorasyonda da malzeme seçimi son derece önemlidir.

Tarihi yapıların korunma-onarımlarında günümüze kadar yapılan tüm çalışmalar sonunda özgün malzemenin korunması ve buna uygun çalışmaların yapılması gerekmektedir.

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
- İnfrared Tomografi Yöntemi
- Yerinde Basınç Deneyi
- Yerinde Kayma Deneyi

2. Laboratuar Çalışması

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

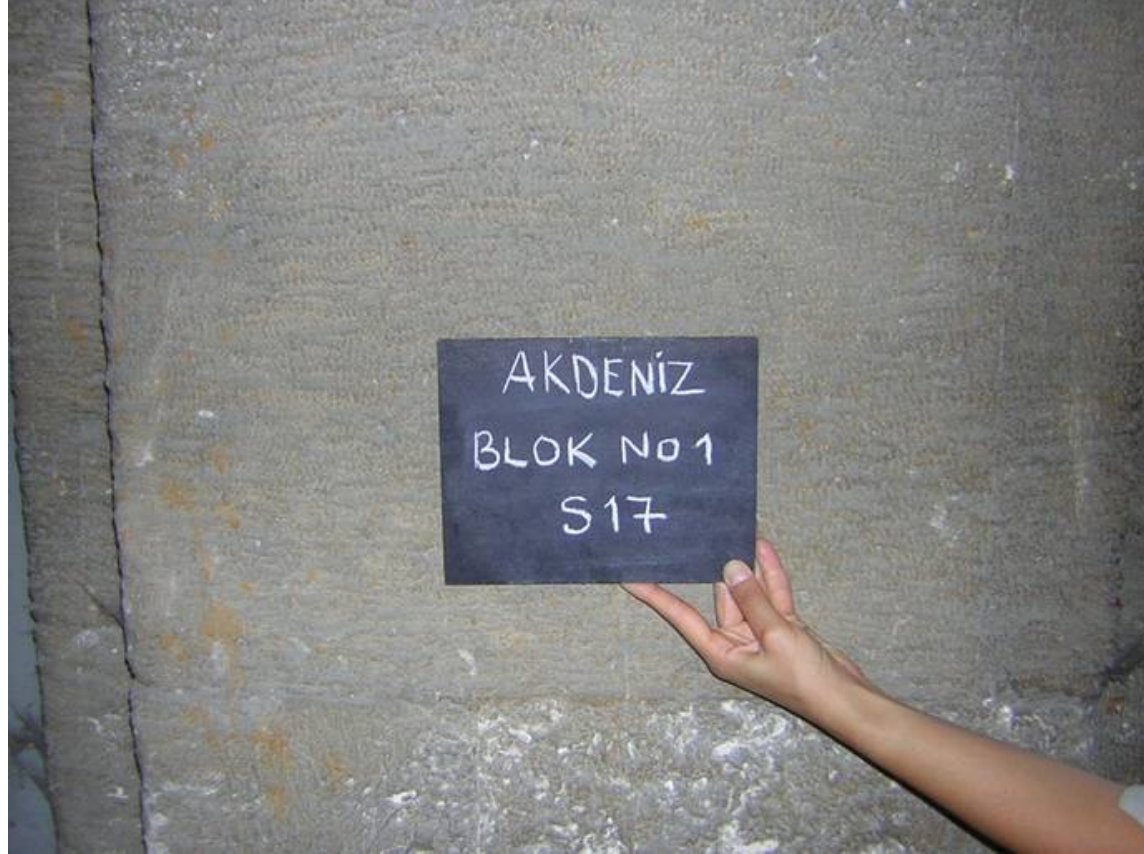
3. Kimyasal Deneyler

4. İç Yapı Analizleri

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Yerinde Yapılacak Çalışmalar

- Ölçüm yapılacak bölgeler kodlanır



Şekil 1: Ölçüm yapılacak bölgenin kodlanması
(Fatih camii ve Külliyesi Malzeme İncelemeleri Raporu,2004)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Yerinde Yapılacak Çalışmalar

- Ölçüm yapılacak bölgelerde varsa kaplama kaldırılır, yüzey temizlenir.



Şekil 2: Ölçüm yapılacak bölgelerin deneye hazırlanması,
(Fatih camii ve Külliyesi Malzeme İncelemeleri Raporu,2004)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Yerinde Yapılacak Çalışmalar

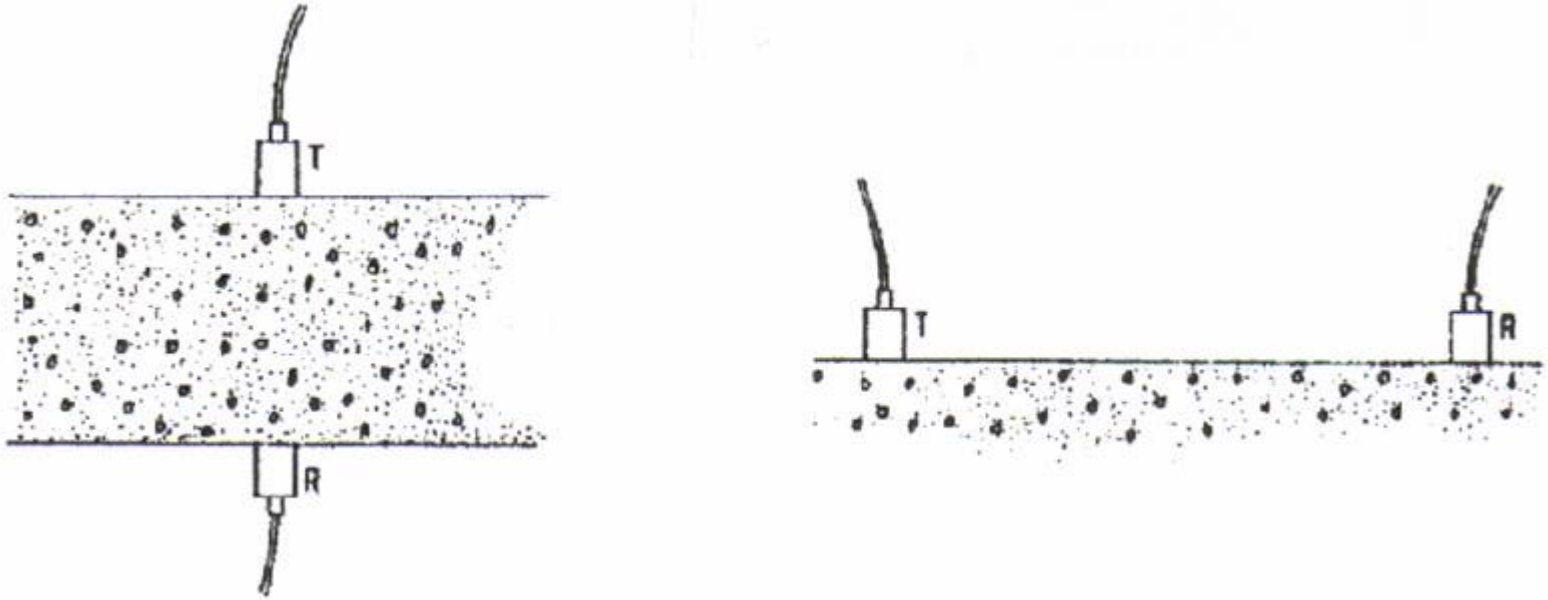
➤Yüzey sıcaklığı ve nemi belirlenir.



Şekil 3: Yüzey sıcaklığının ve neminin belirlenmesi
(Fatih camii ve Külliyesi Malzeme İncelemeleri Raporu,2004)

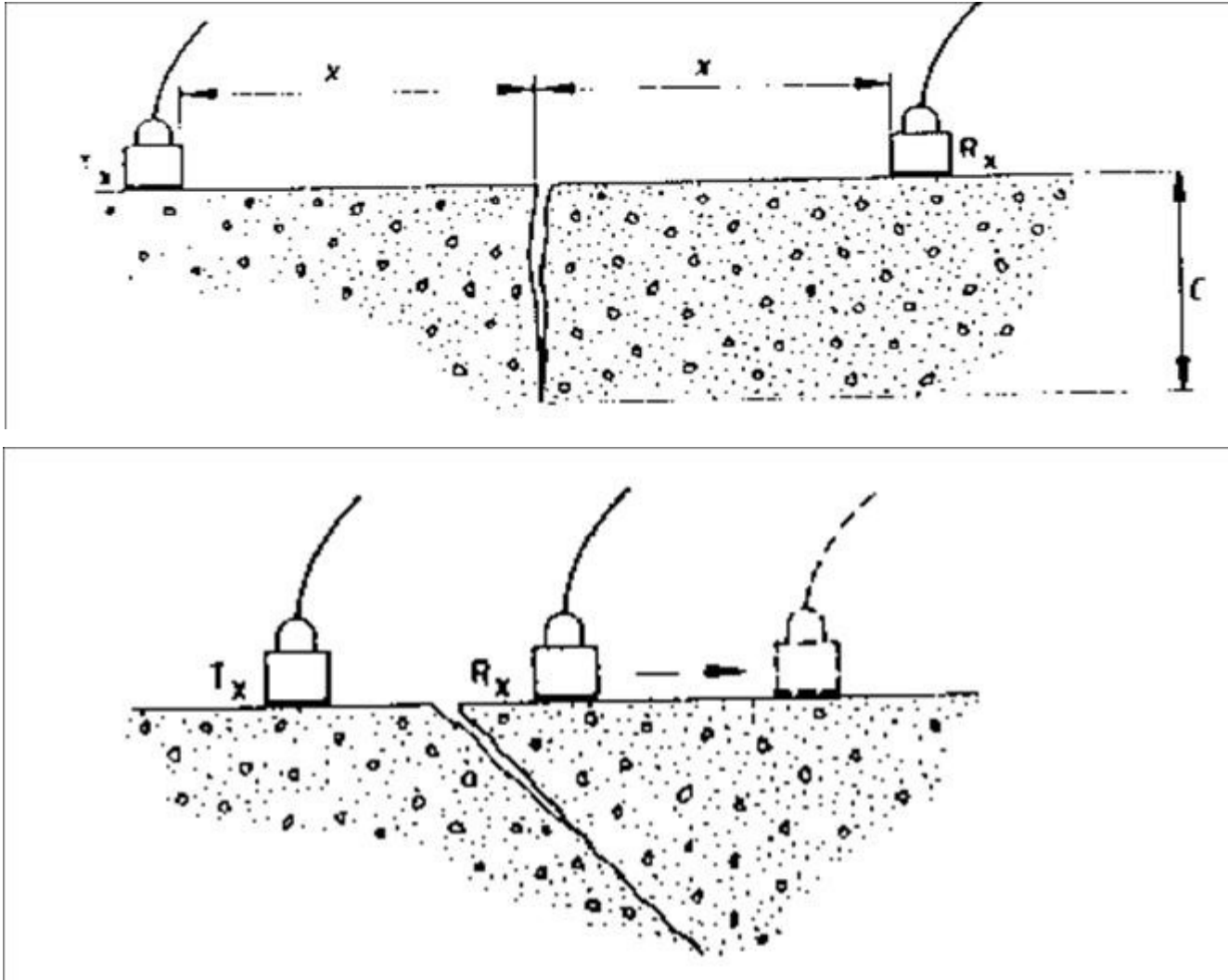
TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤ Ultrases aleti ile ses geçiş süresi ölçölür.



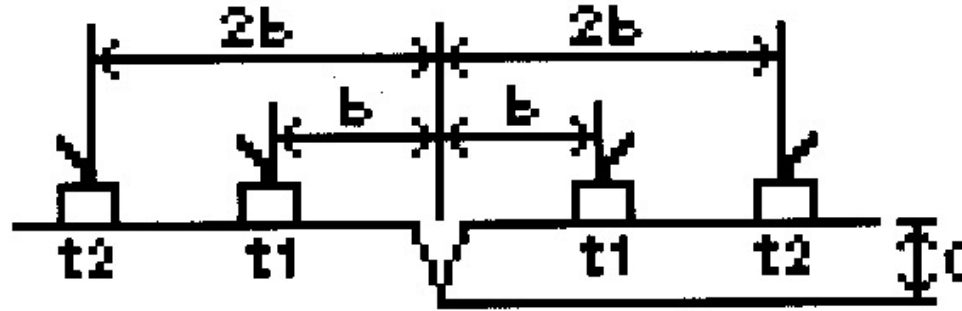
Şekil 4: Ultrases aleti ile ses geçiş süresinin ölçölümü

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



Şekil 5: Ultrases aleti ile çatlak yönü ve derinliğinin araştırılması

Ultrasonik ölçüm ile çatlak derinliğinin araştırılması



Ölçüm noktaları ve çatlak derinliği (c)

Çatlak derinliği aşağıdaki bağıntı ile belirlenir:

$$c = b \times \sqrt{\frac{(4t_1^2 - t_2^2)}{(t_2^2 - t_1^2)}}$$

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



Şekil 6: Ultrases aleti ile ses geçiş süresinin ölçümü
(Fatih camii ve Külliyesi Malzeme İncelemeleri Raporu,2004)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤Yüzey sertliği ölçülür.



N Tipi Schmidt Çekici

(Fatih camii ve Külliyesi Malzeme İncelemeleri Raporu,2004)



P Tipi Schmidt Çekici

(Küçük Ayasofya Camii ,1998)

Şekil 7: Yüzey sertliğinin ölçülmesi

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

- Flat-Jack aleti ile yapıdaki basınç gerilme seviyesi belirlenir gerilme-şekil değiştirme ilişkisi araştırılır,



Şekil 8: Yük altında basınç gerilmesinin belirlenmesi
(Evaluation of Seismic Safety of the Historical Masonry Monuments, TÜBİTAK, 2005)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Flatjack Kullanılarak Yerinde Basınç Gerilmesinin Belirlenmesi (ASTM C 1196-92)

1. Ölçüm yapılacak bölgeler belirlenir.
2. Kuvvet uygulanacak bölgelerde boy değişimi ölçümü yapılmak üzere bölgenin alt ve üst kısımlarına 3'er adet pim yerleştirilir, komparatör ile pimler arasındaki uzaklık ölçülür.



Şekil 9: Kuvvet uygulanacak bölgede pimler arası uzaklığın belirlenmesi

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

3. Kırıcı yardımı ile plakanın (flatjack) girebileceği şekilde harç kaldırılır ve yüzeyler düzeltilir.
4. Harç boşaltıldıktan sonra komparatör ile tekrar ölçüm yapılır ve plaka, açılan bölgeye yerleştirilir.



Şekil 10: Flatjack'in yerleştirilmesi

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

4. Hidrolik pompa kullanılarak plaka aracılığı ile duvar elemanına yük uygulanır, belirli yük aralıklarında boy değişimleri ölçülür.



Şekil 11: Duvar elemanına yükün uygulanması

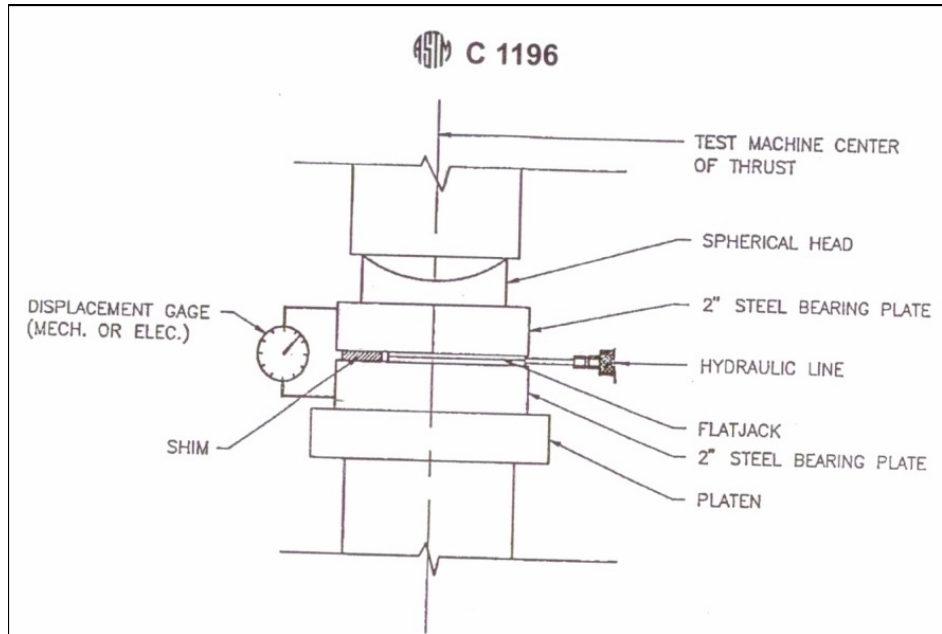
TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

5. Ölçüm yapılan kodlardaki basınç gerilmesi hesaplanır.

$$f_m = K_m \cdot K_a \cdot p$$

f_m : yığma yapıda ortalama basınç gerilmesi (MPa),

K_m : Flatjack kalibrasyon faktörü, $K_m = P_{\text{makine}} / P_{\text{flatjack}}$



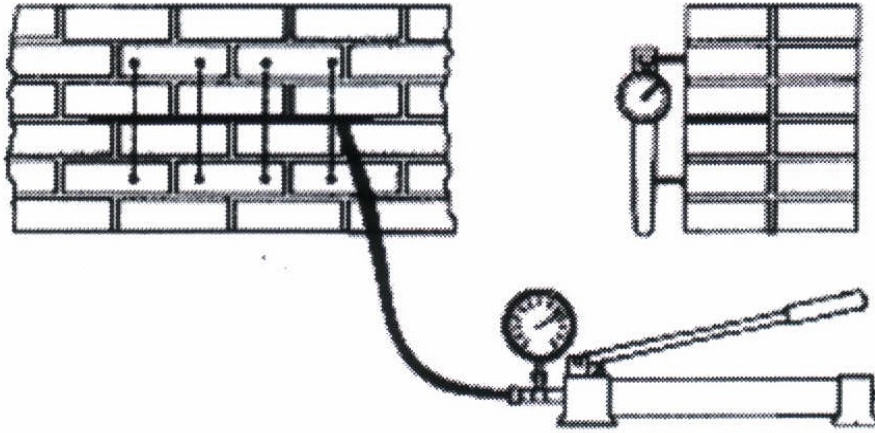
Şekil 12: Kalibrasyon faktörünün belirlenmesi

K_a : Flatjack/açılan bölge alan oranını,

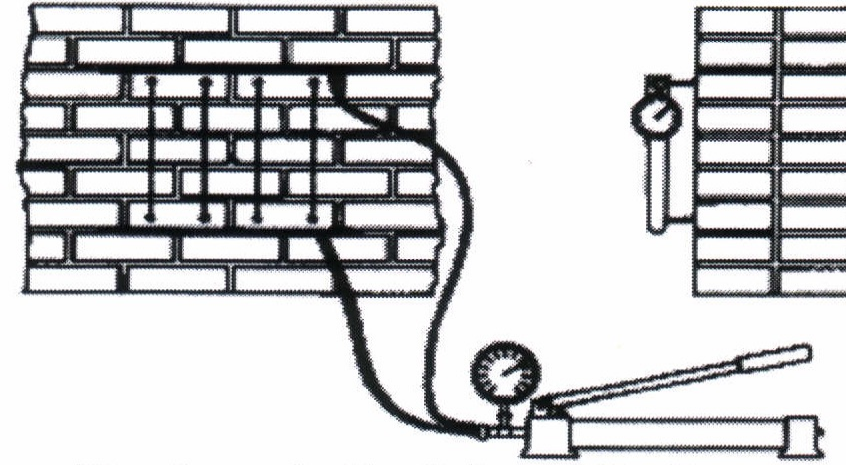
p : Pimler arasında ölçülen mesafenin başlangıçta ölçülen değere gelebilmesi için gerekli olan flatjack basıncı (MPa)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

6. Çift plak yöntemi kullanılarak elastisite modülü belirlenebilir.



Şekil 13: Tek plak ile ölçüm



Çift plak ile ölçüm

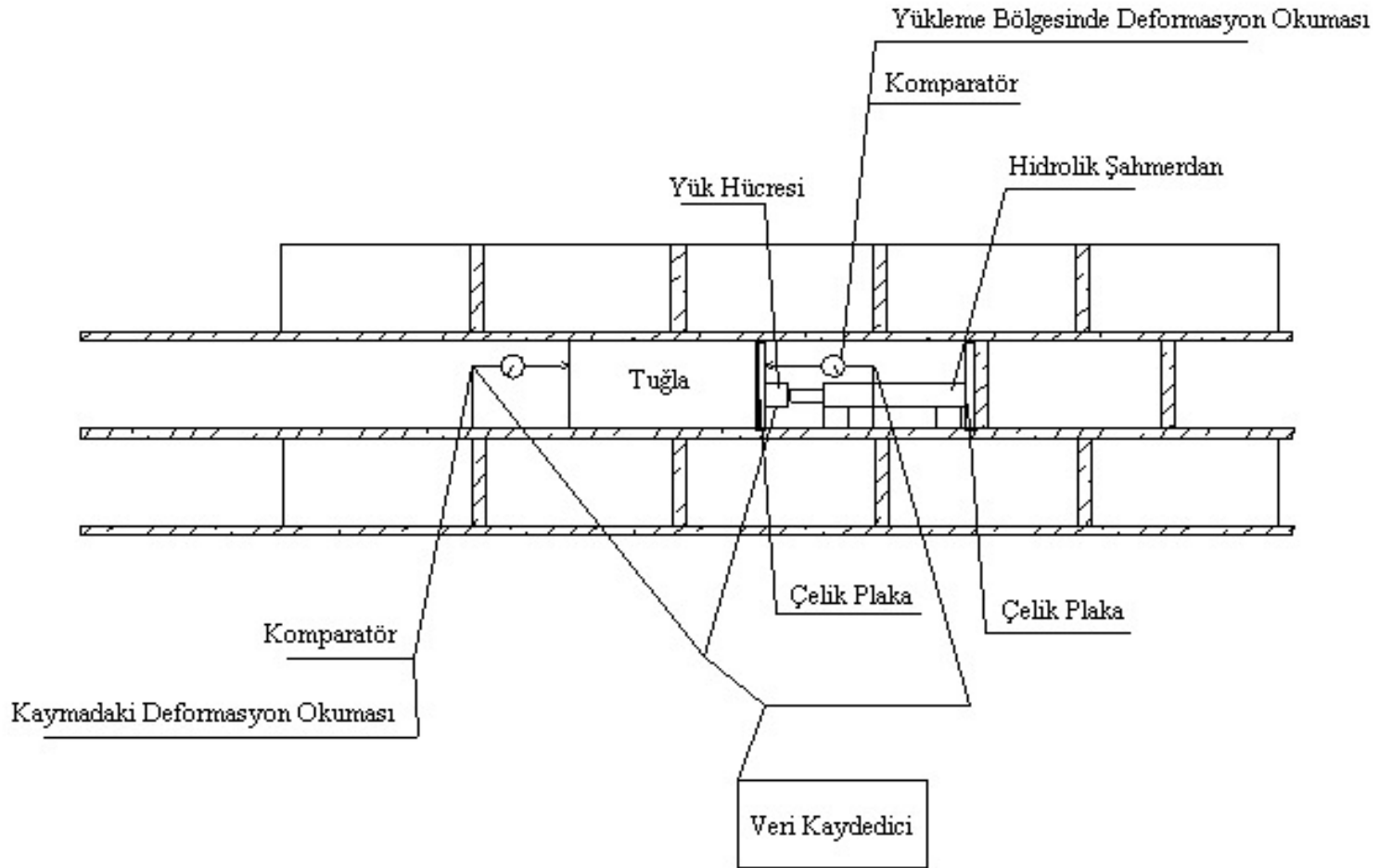
TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤Yapıda tuğla veya taş ile harç arasındaki kayma dayanımı belirlenir.

Yerinde Kayma Dayanımının Belirlenmesi (ASTM C 1531-03)

1. Deney seti, kuvvet uygulayan kompresör, kuvvet ölçer ve deplasmanı tespit eden transducer'den oluşur
2. Ölçüm yapılacak bölgenin iki tarafı açılır,
3. Bir taraftan yatay kuvvet (P_y , kN) uygulanır, diğer tarafa yerleştirilen transducer'un maksimum deplasmanı kaydettiği andaki kayma gerilmesi, yapıdaki kayma gerilmesi indeksi olarak tespit edilir.

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



Şekil 14.a: Yerde kayma deneyi

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



Şekil 14.b: Yük altında kayma deneyi (Bogaziçi Üniversitesi, 2005)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

➤Yapıdan yeterli sayıda örnek alınır.



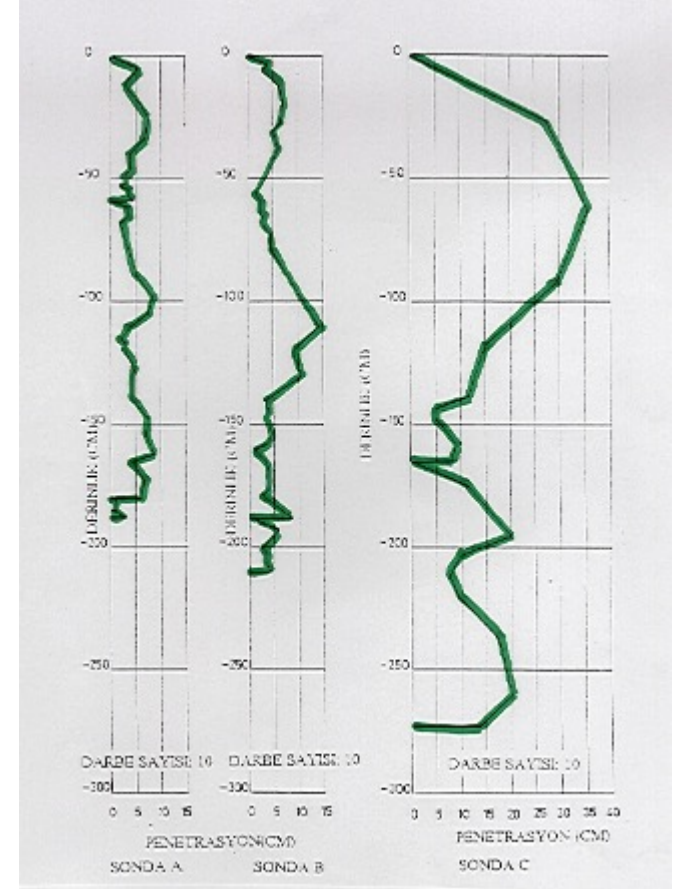
Şekil 15: Karot alınması (Fatih camii ve Külliyesi Malzeme İncelemeleri Raporu,2004)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Zemin Durumunun Belirlenmesi

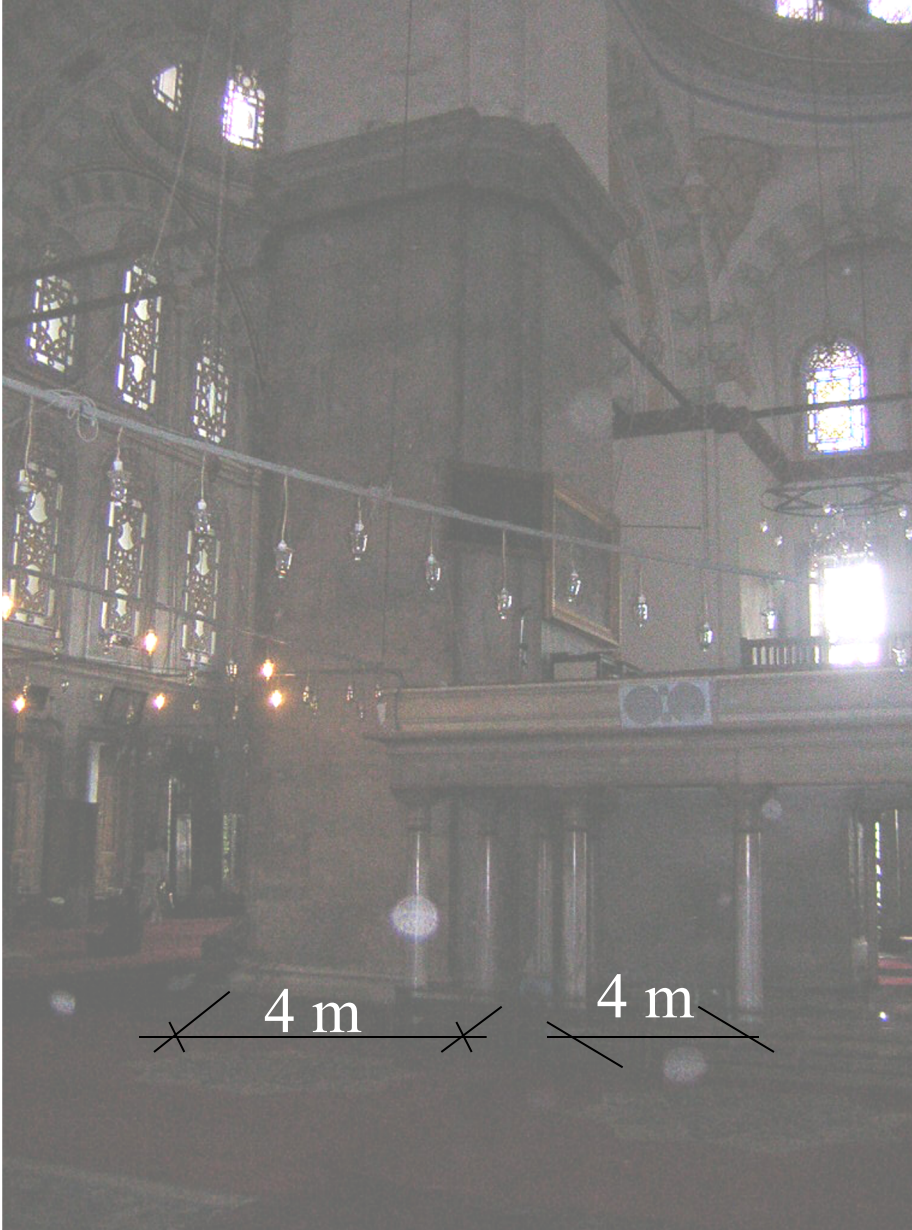


Şekil 16: Zemin durumunun araştırmaları için muayene çukurunun açılması.



Yapının bulunduğu zemindeki hareketlere neden olabilecek konuların araştırılması: (Etraftaki yapılar incelenerek, çevrede drenaj, su kuyusu ya da yeni yapı temel çukuru gibi zemin suyu akış yönünü etkileyecek durumlar araştırılır.

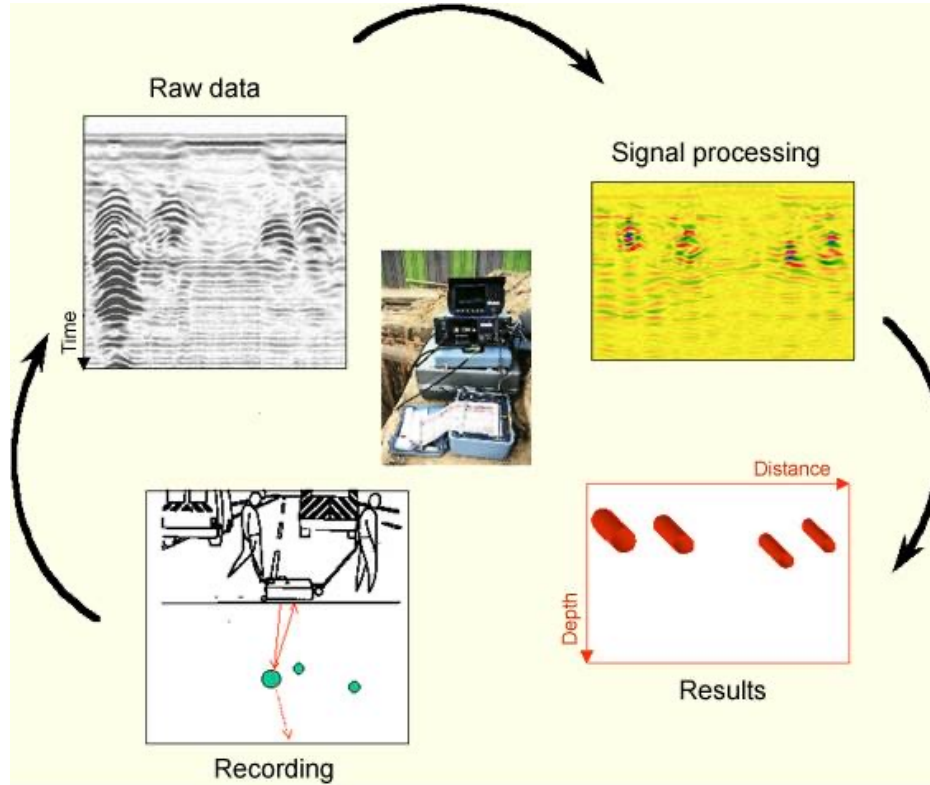
TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



Gerektiğinde georadar ve Endoskopik muayene yöntemlerine başvurulur.

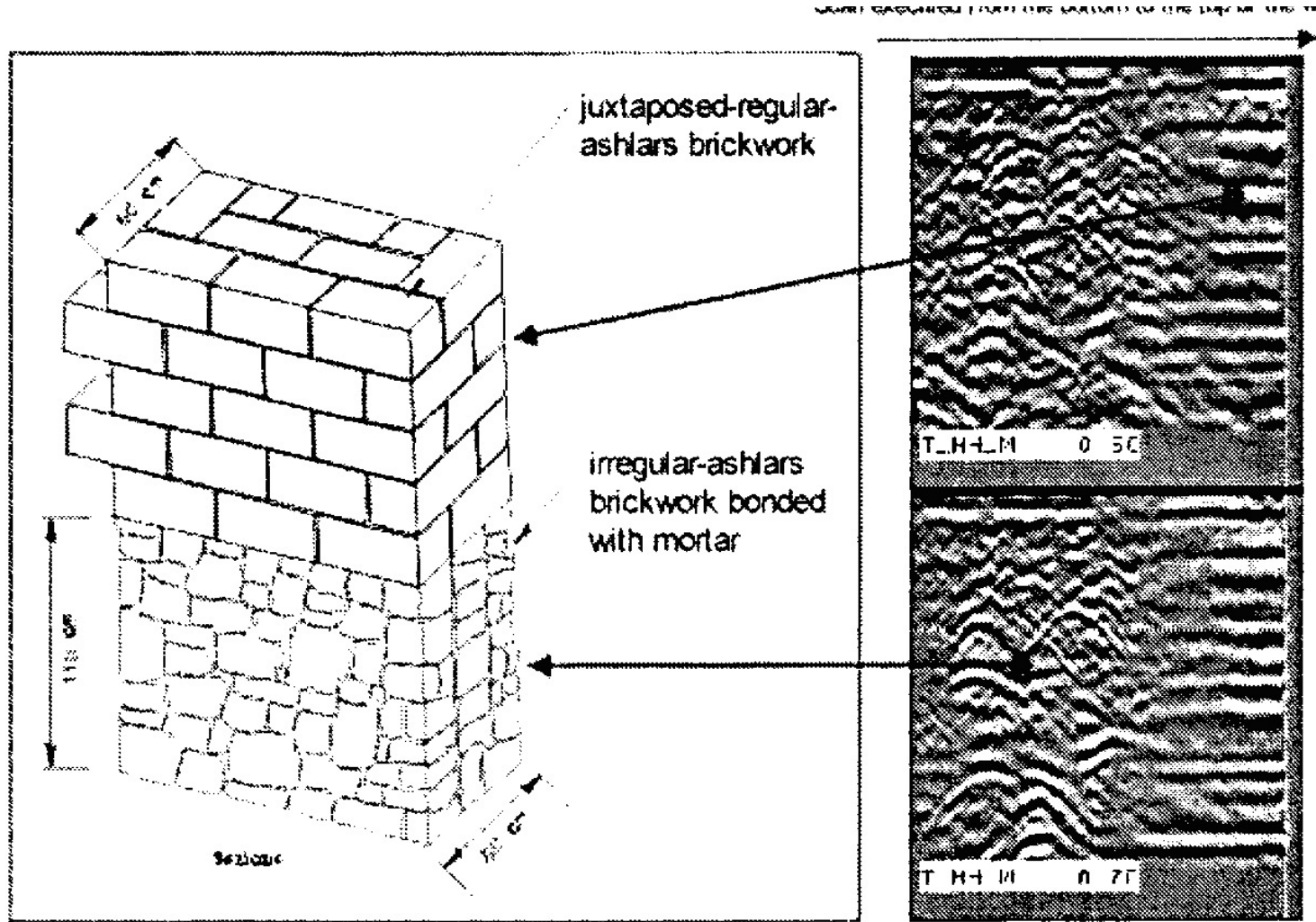
TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

- Georadar yöntemi ile bir ortam içinden elektromanyetik dalgalar gönderilir,
- Alıcı ve verici arasında geçen zaman kaydedilir ve hedeflenen bir bölge taranır,
- Böylece ortamdaki fiziksel süreksizliklerin varlığına bağlı olarak bilinmeyen karakteristikler açığa çıkarılabilir.



Şekil 17.a: Georadar yönteminin uygulanması (www.georadar.net)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



Şekil 17.b: Georadar yönteminin yapıda uygulanması (Gioloti, A. ve Proteco, S.,2001)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



Şekil 18.: Endoskopik yöntemin yapıda uygulanması
(Fatih camii ve Külliyesi)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Laboratuar Çalışmaları

- Alındığı yapıya, kata ve elemana göre kodlanmış numuneler deneye hazırlanır,
- Ultrases aleti ile karşılıklı yüzeylerde ses geçiş süresi ölçülür,
- Kondisyonlanan numunelerde birim ağırlık, su emme, özgül ağırlık deneyleri yapılır,
- Harç numunelerinde, agregaya bağlayıcısından ayrılarak bağlayıcı:agregaya oranı ağırlıkça belirlenir.
- Agregada elek analizi yapılarak, tane dağılımı ve maksimum agregada dane çapı belirlenir.
- Taş ve tuğlada tek eksenli basınç deneyi yapılır.

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Laboratuvar Çalışmaları

Fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenen malzemelerin, onarımda kullanılacak malzeme ile uyumunun araştırılması için :

- Taş, tuğla ve özellikle harç numunelerin mikroyapısal özellikleri belirlenir,
- Bu amaçla iç yapı incelemesi yapılır (XRD, SEM-EDS, TGA).
- Renk ölçümü yapılarak, orijinal malzeme ile onarım malzemesinin renk uyumu sağlanır.

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



Harç



Tuğla

Şekil 19: Numunelerin kodlanması
(Fatih camii ve Külliyesi Malzeme İncelemeleri Raporu,2004)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



Şekil 20: Fiziksel deneyler
(Fatih camii ve Külliyesi Malzeme İncelemeleri Raporu,2004)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Laboratuar Çalışması / Kimyasal Deneyler

Harç örneklerinde nem oranı, kızdırma kaybı ve karbonatlaşma oranının belirlenmesi:

- Numuneler tartılır (W , g),
- 2 saat 105°C 'ta etüvde bekletilir,
- Oda sıcaklığına kadar desikatörde soğutulur,
- Ağırlık yeniden tartılır (W_1 , g),

Nem yüzdesi aşağıdaki eşitlik ile belirlenir:

$$\%Nem = (W - W_1) \times 100 / W_1$$

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Laboratuvar Çalışması / Kimyasal Deneyler

Kızdırma kaybını belirlemek için, numuneler

- 2 saat 1050°C'ta tutulur,
- 1 saat 550°C'ta tutulur,
- 0,5 saat 1050°C'ta tutulur,
- Oda sıcaklığına kadar soğutulur,
- Ağırlıklar tartılarak sırası ile W1, W2 ve W3 belirlenir;



550°C ve 1050°C için kızdırma kayıpları aşağıdaki eşitlik ile belirlenir:

$$\text{Kızdırma kaybı (550 °C)} = (W_1 - W_2) \times 100 / W_1$$

$$\text{Kızdırma kaybı (1050 °C)} = (W_2 - W_3) \times 100 / W_1$$

Karbonatlaşma oranı aşağıdaki eşitlik ile belirlenir:

$$\text{Karbonatlaşma oranı (\%)} = (W_2 - W_3) / W_1 \times (100 / 44) \times 100$$

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Laboratuar Çalışması / Kimyasal Deneyler

Harcın agrega:bağlayıcı oranı kızdırma kaybı ve asit kaybı deneylerinden elde edilir. Asit kaybını belirlemek için:

- Harç örnekler ezilerek toz hale getirilir,
- 100 g toz numune tartılır,
- Bu numuneler kroze içine yerleştirilerek 60 dakika süre ile %10'luk HCl çözeltisi ile karıştırılır,
- Numuneler filtre edilerek kurutulur ve tartılır,
- Asit kaybı oranı belirlenir.

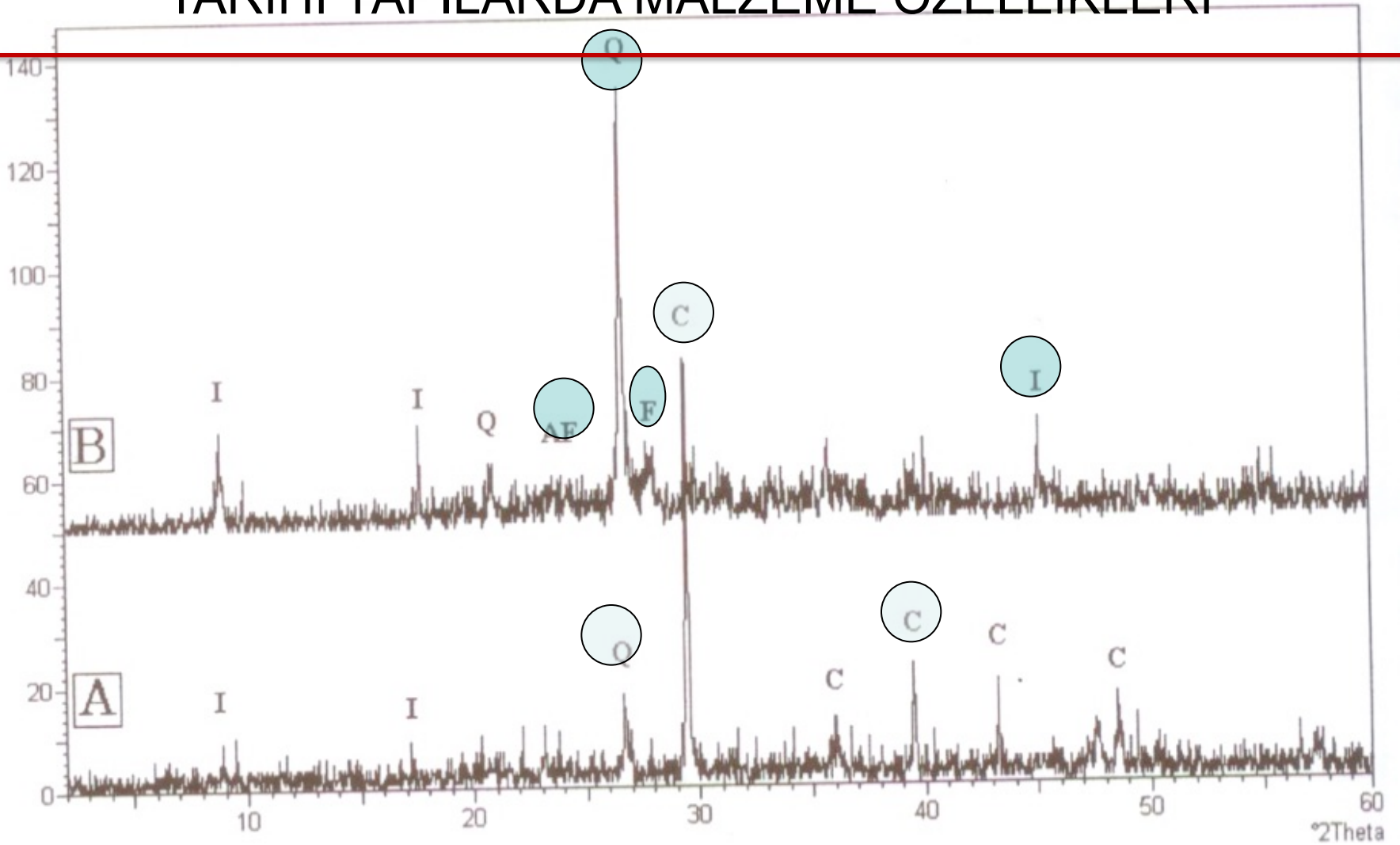


TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



Şekil 21: Tek eksenli basınç deneyi
(Fatih camii ve Külliyesi Malzeme İncelemeleri Raporu,2004)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



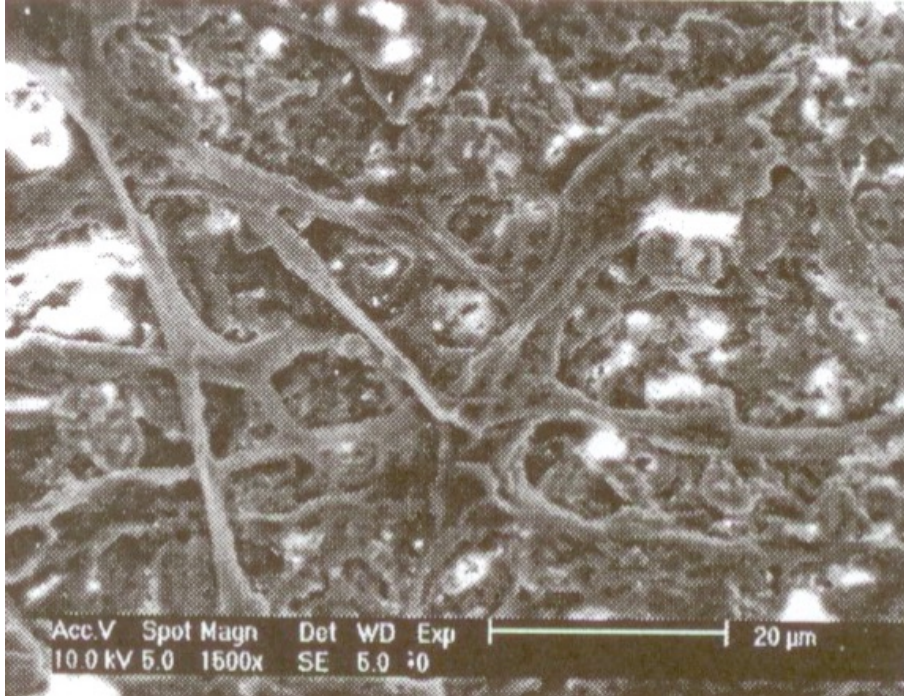
Şekil 22: X Işını kırınımaları (Kılıç vd.,2004)

A) Horasan harcı (Kuartz ve kalsit)

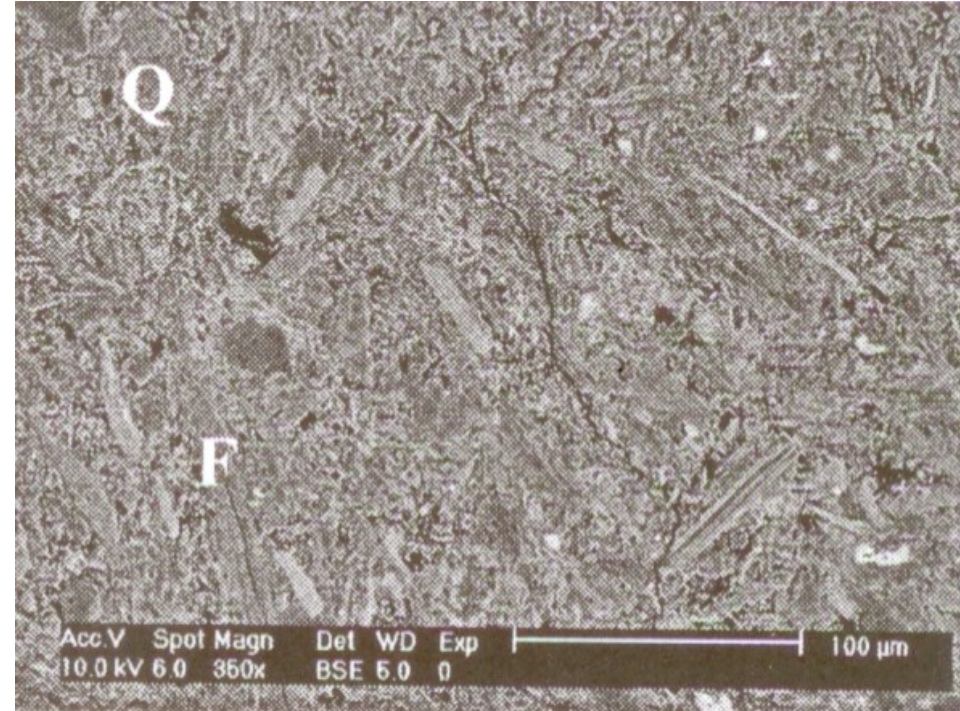
B) Harç içinde kullanılan tuğlalar (Kuvars, Feldspat, İllit)

(I:İllit, Q:Kuvars, F:Feldspat, C:Kalsit, AF:Amorf Faz)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



A



B

Şekil 23: SEM görüntüleri (Kılıç vd.,2004)

A) Horasan harcında tuğla-harç arayüzeyindeki ağ şeklindeki yapı (Kalsiyum, silisyum ve alüminyum'dan oluşmuştur)

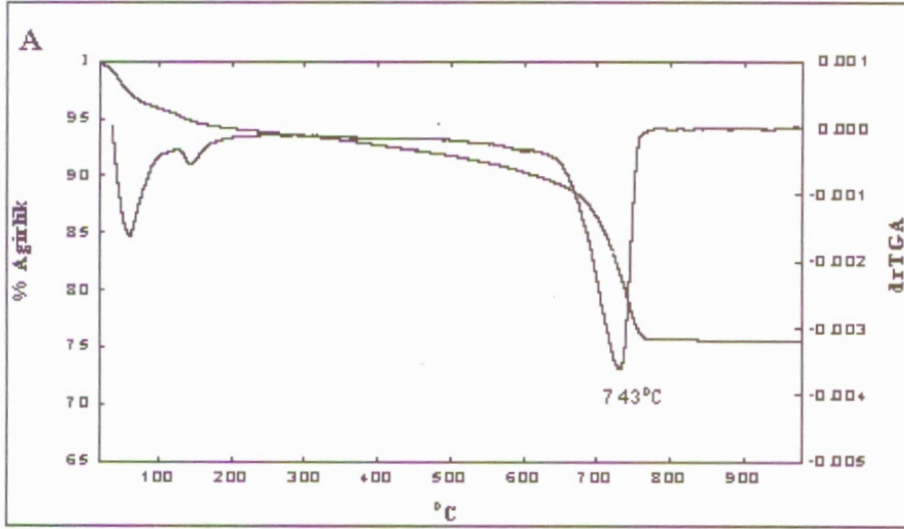
B) Horasan harcı içindeki tuğla matris (Q:Kuvars, F:Feldspat)

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

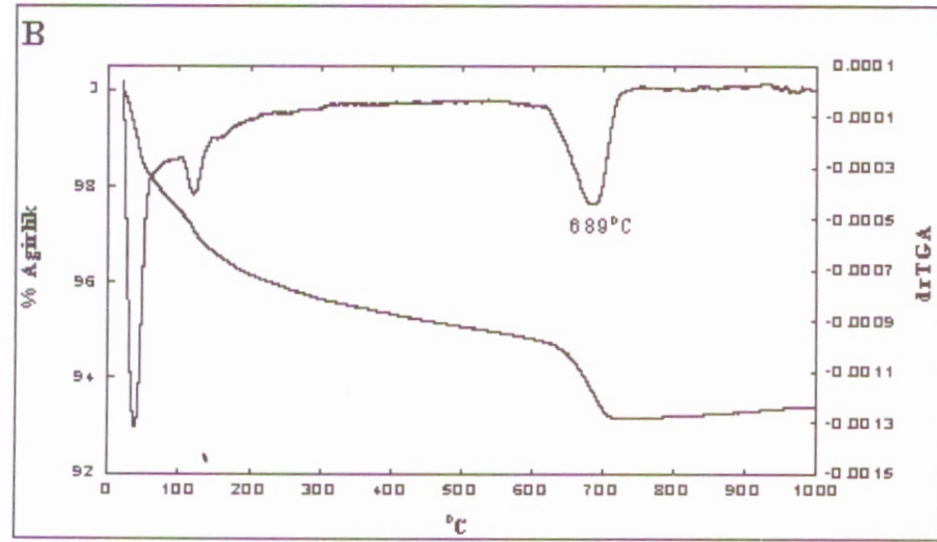
Harç, Arayüzey ve Tuğla kırığı üzerinden alınan EDS analiz sonuçları
(Kılıç vd.,2004)

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

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ



A



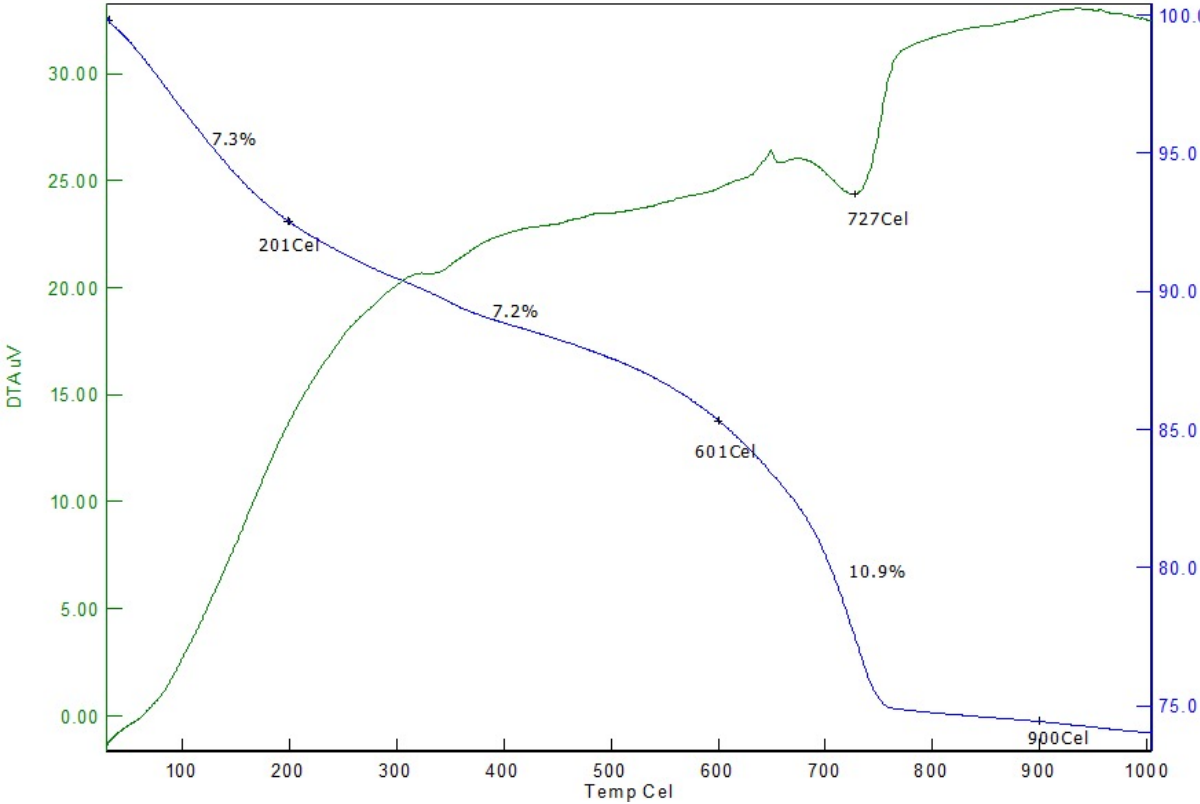
B

Şekil 24: 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

Tahribatlı ve Tahribatsız Deney Sonuçlarının Birlikte Değerlendirilmesi

- Karotun Basınç Dayanımı (f_k , N/mm²) ile karotta ölçülen ultrases hızı (V_k , mm/μs) ve karotun alındığı elemanda ölçülen ve değerlendirilen yüzey sertliği (R_d) arasında istatistiksel bağıntı elde edilir.

$$f_k = f(V_k, R_d) \quad 1$$

- Bu bağıntı yardımı ile karot alınmayan ancak tahribatsız ölçüm yapılan elemanların basınç dayanımı teorik olarak (f_{teo}) hesaplanır.
- Ses geçiş hızı, birim ağırlık ve Poisson oranından yararlanılarak dinamik elastisite modülü hesaplanır.

$$E_d = f(V_k, \beta, u) \quad 2$$

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

ÖNERİLER

Tarihi Mirasın Korunması ile ilgili ulusal ve uluslararası yasa, tüzük ve yönetmeliklerin incelenmesinden;

- Tarihi Yapıların korunması için yapılan bakım, onarım ve güçlendirme işlemlerinde yapının tarihi değeri, estetiği ve kimliği korunmalıdır.
- Koruma, onarım ve güçlendirme çalışmaları bilimsel ilkelere dayanmalı, yapının sistemine ve özgün malzemelerine en az müdahale ile gerçekleştirilmelidir.

TARİHİ YAPILARDA MALZEME ÖZELLİKLERİ

ÖNERİLER

Onarımda kullanılacak malzemenin doğru seçilebilmesi veya üretilmesi için, özgün malzeme özellikleri çok iyi belirlenmelidir. Bu amaç ile

- Tahribatsız deney yöntemlerinden ve laboratuvar deneylerinden yararlanılır.
- Onarımda kullanılacak malzemenin özgün malzeme ile uyumu için fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesinden başka iç yapı incelemesi de yapılmalıdır.