


A RESEARCH ABOUT CHARACTERIZATION OF LIME MORTARS USED IN THE EARLY BYZANTINE PERIOD IN THE LAND WALLS OF CONSTANTINOPLE, YEDIKULE

SUMMARY

The present paper deals with the scientific research related to the characterization of the Land Walls of Yedikule- Istanbul (Constantinople). For characterization purposes simple chemical analysis and petrographic analysis can be adequate, also certain information for the deterioration process can be derived from the aforementioned tests. However, for understanding the ancient production techniques, promenance of the materials and the complicated deterioration processes further scientific research based on instrumental analyses such as DTA, ICP, X-Ray Diffraction, SEM-EDX and Mercury Intrusion tests were conducted. By the results of the tests, the binder and aggregate types and ratios of the mortars were determined. Further more, the physical and mechanical properties and water soluble salt contents of the mortar samples were investigated.

It was determined that the brick pieces, limestone particles and river sand were used as aggregate in these lime mortar samples. And, the deterioration causes are water soluble salts originating from sea spray and polluted air.

Yedikule Kara Surları'nda Kullanılan Erken Bizans Dönemi Harçlarının Karakterizasyonu Üzerine Bir Araştırma

 SEDEN ACUN ÖZGÜNLER*
AHMET ERSEN**
AHMET GÜLEÇ***

1. Giriş

Bu makalede, kargir yapım sistemli tarihi yapılarda kullanılan harçların analizi ile bozulma nedenlerinin ve morfolojilerinin belirlenmesi üzerine yapılan bir bilimsel araştırma anlatılmaktadır. Deneysel çalışmalar için kullanılan örnekler, Kara Surları'nın T4 kulesinin tarihi gelişimi ve kronolojisi göz önünde bulundurularak, önceden tasarlanan bir sistematik dahilinde alınmıştır (Şekil 1). T4 kulesi, ilk olarak 5.yy'ın (M.S. 408-450) ilk yarısında, II.Teodosius zamanında inşa edilmiştir. Rampa ve kuleler, 740'ta olan depremden sonra büyük ölçüde bir rekonstrüksiyon geçirmiştir. 5.yy döneminde rampa ve kulelerin büyük bölümünde onarımlar olmuştur. Bu bilgiler ışığında, T4 kulesinde en az 3 farklı tarihi kat-

man olduğu anlaşılmaktadır. Tarihi harçların karakterizasyonu ile, katmanların tarihlendirilmesinde gerekli veri tam olarak elde edilememektedir; ancak kullanılan malzemeler ve yapım teknikleri hakkında gereken bilgi toplanabilmektedir.

Bu çalışmada karakterizasyon ve bilimsel araştırmalar, hasar nedenlerini ve bozulma morfolojilerini belirleme amaçlı olarak yapılmıştır. Erken dönem (5.yy) özgün harçları, çalışma konusu olarak seçilmiştir. Erken dönem harçlarının kompozisyonları ile fiziksel ve mekanik özellikleri, örnek alınan yere ve bölgeye göre az da olsa değişebilmektedir. Bu yüzden, doğru bir sonuca ulaşabilmek için, her tarihi katmandan çok sayıda örnek alınmış ve test sonuçları referans veri olarak saklanmıştır.

Bu kapsamda, örnek alınan yerler yapının ölçekli çizimlerine işaretlenmiş ve bu belgeleme fotoğraflarla desteklenmiştir. Erken dönem hora-

san harçlarında karakterizasyon, hasar nedenlerini ve morfolojilerini belirlemeye yönelik olarak yapılan deneysel çalışmalar, kimyasal ve petrografik analizler ile fiziksel ve mekanik özelliklerin tespiti için yapılan deneyleri içermektedir. Deneylerde TS 699 ve ilgili ASTM standartları kullanılmıştır. Kimyasal analiz olarak; asit kaybı, elek analizi, kızdırma kaybı, kalitatif ve yarı kantitatif suda çözünen tuz analizleri yapılmıştır. Daha detaylı çalışmalar; parlatılmış ince kesitlerde stereo-optik mikroskop ile yapılan petrografik analizler, DTA, ICP, XRD, SEM-EDX analizleri ve fiziksel ve mekanik özellik deneyleri ile yapılmıştır.

2. Örneklerin Alınması

Örnek alınan yerler, ölçekli çizimler üzerine işlenmiş ve fotoğraflar yardımı ile belgelenmiştir (Tablo 1, Şekil 2-3). Örnek miktarları, deney yöntemine göre değiş-

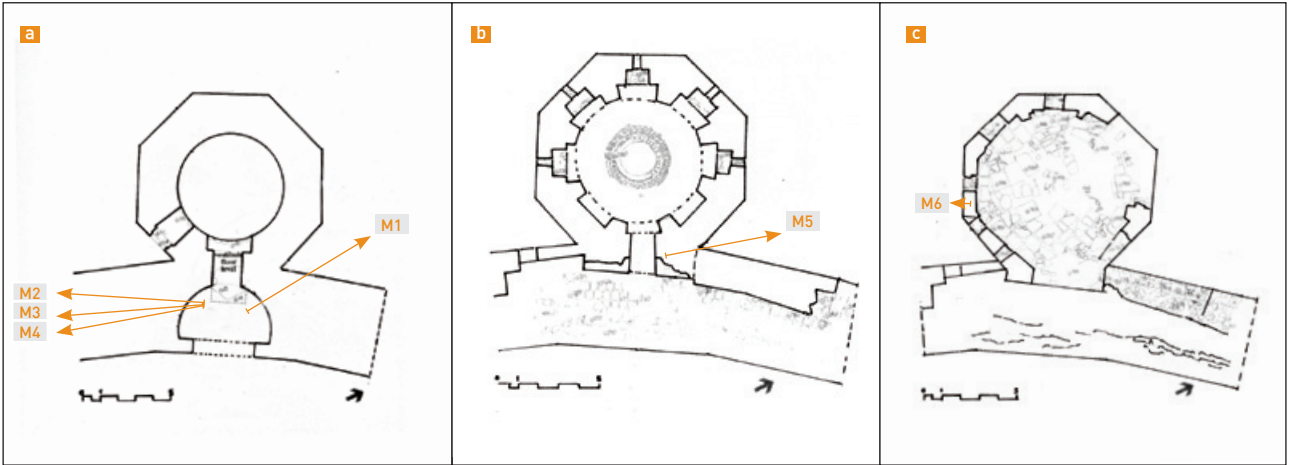
* Ars.Gör.Dr. SEDEN ACUN ÖZGÜNLER, İTÜ Mimarlık Fakültesi, Taşkısla- Taksim, e-posta: acunsed@itu.edu.tr

** Prof.Dr. AHMET ERSEN, İTÜ Mimarlık Fakültesi, Taşkısla- Taksim, e-posta: ersenah@itu.edu.tr

*** Doç.Dr. AHMET GÜLEÇ, İÜ Fen-Edebiyat Fakültesi, Laleli- Beyazıt, e-posta: ahgulec@yahoo.com.tr



Şekil 1. İstanbul, Yedikule karasurlarından genel görünüş, a) T4 kulesi ve karasurlarının görüntüsü 4, b) T4 kulesinden bir detay görüntü.



Şekil 2. T4 kulesinin çizimleri, a) Zemin kat planı, b) Üst kat planı, c) Platform seviyesi planı.

Tablo 1. Örneklerin alınmasında kullanılan kodlama ve belgeleme sistemi

Örnek numarası	Örnek kodu	Örnek konumu	Örnek fotoğrafının bulunduğu şekil numarası
1-2	M1 / M4	+2.00 m	Şekil 3a
3	M2	+2.00 m	Şekil 3b
4	M3	+1.90m	Şekil 3c
5	M5	+1.90m	Şekil 3d
6	M6	+2.00m	Şekil 3e

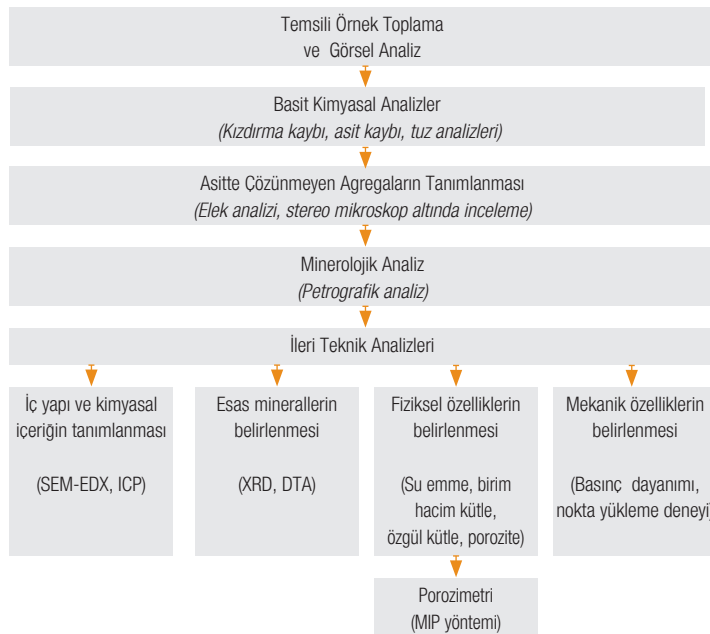
mektedir. Örneğin, kızdırma kaybı ve porozimetri analizleri için birkaç gram yeterli iken; asit kaybı analizi ve fiziksel özellikleri belirlemek için 20-50g örnek gerekmektedir. Petrografik analizler ve SEM analizi için, agregaları ve bağlayıcı-agrega arakesitlerini

gösterecek temsili örnekler hazırlanmıştır. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri için, standart örnek boyutları min. 4x4x4cm olan küpler ile 4x4x16cm olan prizmalar gerekmektedir. Ancak, genellikle kireç harçlarında, bu boyutlarda örnek kesmek mümkün olmamak-

tadır. Bu nedenle standart basınç deneyleri yapılamamaktadır. Bu durumda, küçük örnekler üzerinde yapılabilen nokta yükleme deneyindeki sonuçlar değerlendirilerek, harç örneklerinin basınç dayanımları hakkında genel bir bilgi elde edilebilmiştir.



Şekil 3. (a-f). Örneklerin alınma yerlerini gösteren fotoğraflar



Şekil 4. Karakterizasyon metodolojisinde izlenen adımların yer aldığı deney akış şeması.

3. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar, içerisinde jeolog, kimyager, mimari korumacı ve araştırmacıların olduğu bir disiplin-

ler arası çalışma grubu tarafından yapılmıştır. Bu kapsamda, harç örneklerinin kimyasal, fiziksel ve me-

kanik özellikleri araştırılmıştır. Şekil 4'te, karakterizasyon yöntemindeki adımlar, sistematik olarak

akış şeması halinde gösterilmektedir. Örneklerin kimyasal, mineralojik ve diğer analitik araştırmalarından önce; görsel olarak renk, doku, görünen agregalarının (tip, boyut, renk gibi) özellikleri, kohezyon ve sağlamlıkları incelenmiştir. Harç örneklerinin görsel, petrografik ve basit kimyasal analiz sonuçları, bulunan bağlayıcı-agrega özellikleri ve bağlayıcı-agrega oranları Tablo 2-5'te gösterilmektedir.

3.1. Kimyasal Analizler

Basit kimyasal analiz olarak adlandırılan kızdırma kaybı analizi, asit kaybı ve elek analizi ile suda çözünen tuzların kalitatif ve kantitatif analizleri yapılmıştır. Kızdırma kaybı analizi için, çok ince öğütülerek hazırlanan 500mg ağırlığındaki örnekler, porselen krozelere konmuştur. Porselen

kroze içine konan örnekler, 105°C, 550 oC ve 1050 °C'lerde kül fırınında, sırasıyla 2 saat, 1 saat ve yarım saat tutulmuştur. Her ısıl işleminden sonra, örnekler desikatörün içinde soğutulmuş ve ağırlıkları tartılmıştır. Örneklerin, ağırlık farklarından nem oranı, 550 °C'deki kızdırma kaybı ve kalسيوم karbonat miktarları hesaplanmıştır (Tablo 3). Harçlarda hasara neden olan suda çözünen tuzların (klor, sülfat, nitrat, karbonat gibi), kalitatif ve yarı kantitatif analizleri yapılmıştır. Tuzların toplam miktarları, ölçülen iletkenlik değerleri ile değerlendirilmiştir. Her harç örneği için bir stok çözelti hazırlanarak (0.50g örnek, 50ml deiyonize su), suda çözünen tuzların analizi ile iletkenlik ölçümleri yapılmıştır (Tablo 2).¹

Asit kaybı ve elek analizi için, örneğin bağlayıcı matrisi %10'luk HCl

asit ile reaksiyona sokulmuş; işlem sonunda silisli agrega ve diğer çözünmeyen malzemeler ayrılarak, asitte kayıp oranları hesaplanmıştır. Asit kaybı analizi sonunda kalan agregalarda elek analizi yapılmış, boyutları ve bulunma oranları hesaplanmıştır. Daha sonra bu agregaların tipleri, boyutları, renkleri, içerikleri ve ortalama bulunma oranları, stereo-optik mikroskop yardımı ile belirlenmiştir. 25-50g'lık kuru örnek, HCl asit ile tepkimeye sokularak bağlayıcı matris çözünmüş ve asitte çözünmeyen kısım filtreden geçirilerek yıkanmış ve tekrar 105oC'de etüvde kurutulmuştur. Asitte çözünmeden kalan silisli agregalar; 125, 250, 500 ve 1000 mikron ile 2,4 ve 8mm'lik eleklerden geçirilmiştir. Eleklerden geçen çeşitli boyutlardaki agregalarda stereo mikroskop altında görsel analizler yapılmıştır (Tablo 3-4).

Tablo 2. Harç örneklerinin yarı kantitatif tuz analizi ile iletkenlik testi sonuçları

Örnek	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	NO ₃ ⁻	İletkenlik (µs)
M1	+++	+	-	++	484
M2	++++	+	-	+++	776
M3	++++	+	-	++	782
M4	+++	±	-	+	357
M5	++++	-	-	++	754
M6	++++	+	-	++	902
Distile su	-	-	-	-	6.7

- : Yok; ± : Çok nadir var ; + : Var

++ : Belirgin miktarda var ; +++ : Fazla var; ++++ : Çok fazla var.

Tablo 3. Harç örneklerinin asit kaybı, elek analizi ve kızdırma kaybı sonuçları

Örnek No	Nem %	550° C %	CaCO ₃ %	Asit Kaybı %	Asitten Kalan %	İri (*) Agregalar A, %	İri (**) Agregalar B,%	(***) 1000 %	(***) 500 %	(***) 250 %	(***) 125 %	(***) <125 %
M1	1.81	4.17	45.59	51.35	48.65	15.08	26.74	57.34	4.84	28.63	3.61	5.58
M2	4.27	4.97	27.96	63.35	36.65	25.73	48.59	66.39	3.44	20.98	2.46	6.72
M3	4.58	9.12	40.43	60.53	39.47	0.00	0.00	57.33	2.76	28.00	4.18	7.73
M4	1.05	4.23	55.76	47.25	52.75	0.00	0.00	65.50	3.61	22.42	2.44	6.04
M5	4.41	6.94	28.28	39.95	60.05	13.95	21.26	48.37	3.42	42.31	2.31	3.58
M6	5.13	6.20	26.14	53.55	46.45	18.45	32.75	58.05	6.23	27.44	2.36	5.93

(*) : İri agregaların, harç örneği içindeki bulunma oranı

(**) : İri agregaların toplam agrega içindeki bulunma oranı

(***) : 8 mm elek altı agregaların bulunma oranları

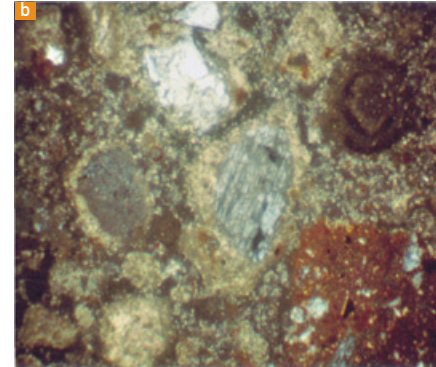
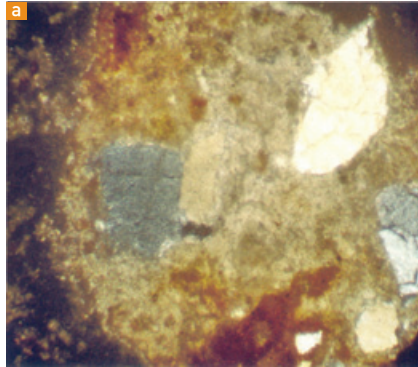
¹ (Ahunbay, vd., 2003; Güleç ve Ersen, 1998; Güleç ve Tulun, 1997; Güleç, 1990)

Tablo 4. Harç örneklerinin agregalarının elek analizi sonuçları

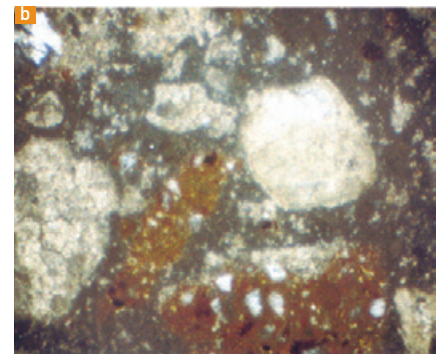
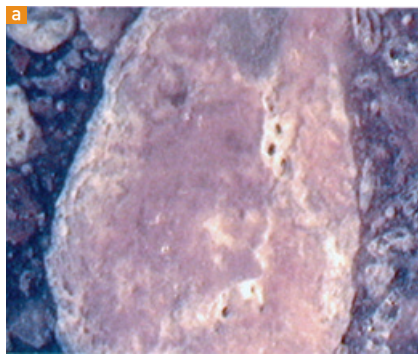
Örn. No	Asitte Çözünmeyen (%)	İri Agregalar		(8 - 1mm) %		Ortalama Oranlar (8 - 4mm) %		1-8 mm agregalar (4 - 1mm) %		(1 - 0,125 mm) %		Kalan% (> 0,125)
		BP (%)	S (%)	BP (%)	S (%)	BP (%) İri	S (%) İri	BP (%) Orta	S (%) Orta	BP (%) İnce	S (%) İnce	
M1	56.4	21.02 (10-15 mm)		54.26		20 (4-7 mm)		80 (1-4 mm)		21.5		3.23
		100	0	45-50	50-55	100	0	30-35	65-70	30-35	65-70	
M2	52.95	32.23 (10-12 mm)		55.83		60-65 (4-8mm)		25-40 (1-4 mm)		9.55		2.39
		100	0	60	40	100	0	50	50	75-80	20-25	
M3	39.47	0		57.33		60 (4-10 mm)		40 (1-4 mm)		34.94		7.73
				80	20	95	5	30	70	40-45	55-60	
M4	52.75	0		65.5		40 (4-12 mm)		60 (1-4 mm)		28.47		6.04
				50	50	95	5	20-25	75-80	25	75	
M5	65.62	17.41 (13 mm)		48.94		75 (4-8 mm)		25 (1-4 mm)		31.32		2.33
		100	0	40	60	50	50	35	65	15	85	
M6	56.33	24.62 (15-20 mm)		54.09		25-30 (4-9 mm)		70-75 (1-4 mm)		18.28		3.01
			0	50	50	50	50	50	50	50	50	

3.2. Petrografik Analizler

Petrografik analizlerde incelenen ince kesitler, dağılan yapıdaki harç örneklerinin epoksi reçinesine (*Araldite AY103- Hardener HY956, Ciba-Geigy*) daldırılmasıyla elde edilen örneklerden hazırlanmıştır. Örneklerin mineralojik içeriklerinin kalitatif ve yarı kantitatif olarak değerlendirilmesi amacıyla mineraller tanımlanmıştır. Bu ince kesitleri kullanarak, örnekler arasında mineral içeriği bakımından benzerlik veya farklılıklar olup olmadığı belirlenmiştir. Petrografik analizler, asitte çözünen parçacıkları da belirlemeye yardımcı olmaktadır. Petrografik analiz sonuçları, Tablo 5'te gösterilmiştir. Örnekler epoksi reçinesine daldırıldıktan sonra düşük hızlı bir testere ile kesilerek, ince kesitler elde edilmiştir. Örneklerin kesitleri 30 mikrona kadar inceltirilmiştir. Minerallerin kalitatif ve yarı kantitatif analizi, polarize mikroskop altında yapılmıştır (Şekil 5-6).²



Şekil 5. (a). Feldspat, kuvars ve tuğla parçacıklarının ince kesitteki görüntüsü
(b). Feldspatların alterasyonu ve kil oluşumu



Şekil 6. (a). İri boyutlu parçacık görüntüsü, (b). Harç örneğinin ince kesitinde, %60 oranında kireçtaşı parçacığı ve %40 oranında kuvarsit ve tuğla parçacıkları bulunmaktadır.

² (Ahunbay, vd., 2003; Güleç ve Ersen, 1998; Güleç ve Tulun, 1997; Güleç, 1990; Moropoulou, vd., 2000; Charola, vd., 1984)

Tablo 5. Harç örneklerinin görsel ve petrografik analiz sonuçları ile kompozisyonları

Örnek No	Renk	Durumu	Partikül ve Mineraller (*)	İri Agregalar (%)		Ortalama Kompozisyonlar (%) Bağlayıcı:BP:S
				BP (%)	S (%)	
M1	Pembe	Zayıf- Dağılgan	BP,LS,Mr,Qz,Gr,OrC,Q,Pr	21.02 (10-15mm)	0	30-35:30-35:30-35
M2	Gri-Beyaz	Sağlam	BP,LS,SS, Q,OrC, Q	32.23 (10-12mm)	0	25:50:25
M3	Koyu Pembe	Dağılgan	BP,LS,Qz,OrC,PC	0		30-35:40-45:25
M4	Koyu Pembe	Sağlam	BP,LS,Qz,OrC,PC	0		30:40-45:25
M5	Pembe	Sağlam	BP,Qz,LS,Q,OrC	17.41 (13mm)	0	30:40:30
M6	Açık Pembe	Sağlam	BP,LS,Qz,Gr,OrC,PC,Q	24.62 (15-20mm)	0	20-25:40:40

(*) M	: Harç örneği	Qz	: Kuvarsit parçacıkları
B	: Biyotit parçacıkları	S	: Kum tanecikleri
Q	: Kuvars parçacıkları	PC	: Plajiyoklas parçacıkları
SS	: Kumtaşı parçacıkları	Gr	: Granit parçacıkları
LS	: Kireçtaşı parçacıkları	BP	: Tuğla parçacıkları
AIF	: Alkali fedspat parçacıkları	Mr	: Marn parçacıkları
OrC	: Ortoklas parçacıkları	Pr	: Piroksen parçacıkları

3.3. İleri Teknik Analizleri

T4 kulesinden alınan harç örneklerinde, ileri teknik analizleri olarak DTA, ICP ve SEM-EDX analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarına göre, farklı tarihi katmanlara ait örneklerin benzerlik ve farklılıkları karşılaştırılmıştır. Bu analiz-

lerden elde edilen sonuçlar, basit kimyasal analizlerin sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Örneklerin toplam içeriği ICP analizi ile bulunmuş; Tablo 6'da gösterilmiştir. Mikro yapı, genel dokular ve hamur matrisin kimyasal ve fiziksel özellikleri, SEM-EDX analizle-

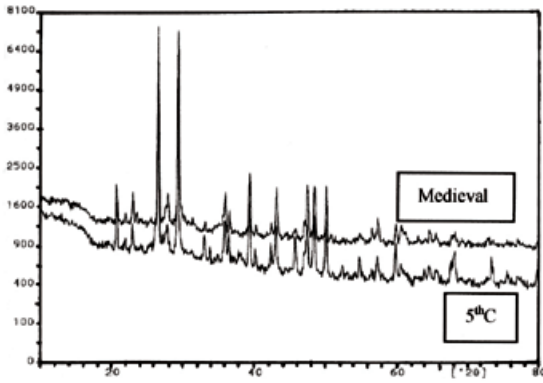
ri ile belirlenmiştir. XRD ve DTA analizleri ise, temel mineralojik kompozisyonların belirlenmesi için yapılmıştır (Şekil 7-8). Örneklerin genel mineralojik kompozisyonları XRD analizleri ile belirlenmiş; Şekil 7'de grafik olarak gösterilmiştir.

Örnek ,	"SiO ₂ " %	"Al ₂ O ₃ " %	"Fe ₂ O ₃ " %	"MgO" %	"CaO" %	"Na ₂ O" %	"K ₂ O" %	"TiO ₂ " %	"P ₂ O ₅ " %	"MnO" %
Harç 1,	38.27,	4.35,	1.66,	0.64,	27.18,	1.05,	1.11,	0.23,	0.07,	0.06,
Harç 2,	47.40,	6.74,	2.80,	1.32,	17.34,	2.02,	1.48,	0.30,	0.11,	0.05,
Harç 3,	33.33,	4.53,	1.83,	0.84,	27.57,	1.22,	1.10,	0.29,	0.16,	0.06,
Harç 4,	32.63,	3.07,	1.19,	0.62,	31.48,	0.88,	0.96,	0.15,	0.10,	0.06,
Harç 5,	49.37,	4.78,	1.62,	0.51,	18.44,	1.88,	1.08,	0.27,	0.05,	0.06,
Harç 6,	52.74,	5.71,	2.02,	0.56,	15.91,	1.80,	1.24,	0.34,	0.10,	0.07,

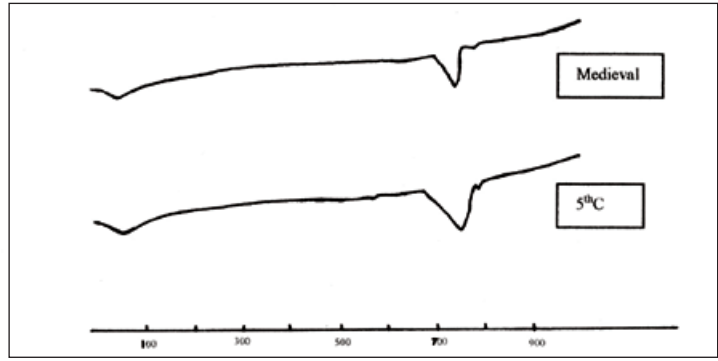
"Cr ₂ O ₃ "	"Ba"	"Ni"	"Sr"	"Zr"	"Y"	"Nb"	"Sc"	"LOI"	"TOT/C"	"TOT/S"	"Cl"	"SUM"	Örnek
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	ppm	%	
0.008,	414,	39,	626,	70,	15,	<10,	4,	25.2,	6.09,	0.07,	3898,	99.96	Harç 1
0.005,	219,	32,	225,	68,	13,	<10,	6,	20.3,	3.73,	0.05,	11600,	99.93	Harç 2
0.005,	275,	28,	662,	78,	15,	<10,	4,	29.0,	5.90,	0.12,	5334,	100.0	Harç 3
<0.001,	267,	22,	788,	34,	13,	<10,	3,	28.8,	7.04,	0.12,	3147,	100.07	Harç 4
0.003,	264,	<20,	332,	73,	13,	<10,	4,	21.8,	4.01,	0.02,	10849,	99.95	Harç 5
0.002,	978,	21,	310,	87,	15,	<10,	5,	19.3,	3.46,	0.10,	8968,	99.95	Harç 6

Tablo 6. Erken Bizans dönemi horasan harcı örneklerinin ICP analiz sonuçları

(M1-M6: Harç örnekleri)



Şekil 7. Erken Bizans dönemi harçları ile Ortaçağ harçlarının XRD sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği



Şekil 8. Erken Bizans dönemi harçları ile Ortaçağ harçlarının DTA sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği (675°C ile 756°C arasında olan büyük endotermik pik CaCO₃'ün ayrıştığını göstermektedir.)

3.4. Fiziksel Özellikler

Harçların fiziksel özelliklerini belirlemek için yapılan deneyler; atmosfer basıncı altında su emme (ağırlıkça/ hacimce, %), birim hacim kütle (g/cm³), özgül kütle (g/cm³), kompasite (%), porozite (%), doyma derecesi (%) vb.'dir. Bu deneylerde, başta TS 699 standardı olmak üzere, benzer şekilde ilgili ASTM standartlarından da yararlanılmıştır. Deney sonuçları Tablo 7'de gösterilmiştir. Harçların içinde bulunan toplam gözenek boyutunun ve dağılımının belirlenmesi için yapılan porozimetri deneyleri, MIP yöntemi ile TÜBİTAK laboratuvarlarında yaptırılmıştır; deney sonuçları Tablo 8'de gösterilmiştir.

3.5. Mekanik Özellikler- Nokta Yükleme Deneyi

T4 kulesinden alınan erken döneme ait horasan harcı örnekleri dağılan yapıda oldukları için, mekanik özellikleri tek eksenli basınç dayanımı deney yöntemi ile bulunamamıştır. Bu nedenle, özgül harçların basınç dayanımları; nokta yükleme deney yöntemi ile bulunan sonuçların, 'International Society for Rock Mechanics-ISRMC Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests' tarafından önerilen bir formül (katsayı) yardımıyla basınç dayanımına dönüştürülmesi ile bulunmuştur.

4. Sonuçların Değerlendirilmesi

Petrografik analiz (Tablo 5), kızdırma kaybı (Tablo 3) ve asit kaybı ile elek analizi (Tablo 3-4) sonuçlarıyla, erken dönem Bizans harçlarının bağlayıcı/agrega oranları belirlenmiş-

Tablo 7. Harç örneklerinin fiziksel özellikleri

Örnek No	WA (ağırlıkça) (m/m, %)	WA (hacimce) (v/v, %)	D (g/cm ³)	SG (g/cm ³)	C (%)	P (%)	SD (%)
M1	21.08	34.02	1.62	2.63	61.60	38.40	88.60
M2	13.43	26.86	2.00	2.56	78.14	21.86	100.00
M3	21.49	35.50	1.65	2.59	63.70	36.29	97.83
M4*	-	-	-	-	-	-	-
M5	15.26	26.50	1.73	2.59	67.05	32.95	80.42
M6	19.30	32.42	1.68	2.53	66.40	33.60	96.49

* Belirlenememiştir.

WA : Su emme oranı

D : Birim hacim kütle

SG : Özgül kütle

C : Kompasite

P : Porozite

SD : Doyma derecesi

Tablo 8. Harç örneklerinin boşluk boyutu dağılımı değerleri

Örnek	Toplam Boşluk (ml/g)	Ortalama (Median) Boşluk Çapı (µm) (Boşluk hacmi)	Ortalama Boşluk Çapı (µm)
Harç 1 (5.yy)	0.2151	0.3409	0.0704

Mikro boşluk, $r < 0.001 \mu\text{m}$ ($<10 \text{ \AA}$), Mezo boşluk, $r = 0.001-0.0025 \mu\text{m}$ ($10 \text{ \AA}-250 \text{ \AA}$)

Makro boşluk, $r > 0.025 \mu\text{m}$ ($>250 \text{ \AA}$)



Şekil 9. Nokta yükleme deneyi

Tablo 9. Harç örneklerinin mekanik özellikleri

Örnek	Nokta Yükleme ile Bulunan Basınç Dayanımı (MPa)	Tek Eksenli Yükleme Altında Basınç Dayanımı (MPa)
5.yy harcı	0,4*	4*

* Değerler yaklaşık olarak alınmıştır.

tir. Katkılar ve onların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri de belirlenmiş; Tablo 6 ve 7’de gösterilmiştir. Asitte çözünmeyen agregaların olması, onların boyutları ile ilgili bilgi edinmemizi sağlamıştır. Özellikle, çakıl boyutundaki ve daha küçük tuğla parçacıkları, en fazla 8-20mm boyutludur. Onların oranları ve toplam içindeki ağırlıkları bulunmuş ve sonuçları Tablo 3-4’te verilmiştir. Çakıl boyutunda iri boyutlu tuğla agregalarının toplam kütle içindeki bulunma oranları %17-32 arasındadır; Tablo 4-5’te gösterilmiştir. İri boyutlu agregaların toplam agregalar içindeki oranı % 82’dir.

Harç örneklerinin petrografik analizleri, kireçtaşı parçacıklarını da içermektedir. Bu kireçtaşı parçacıkları, yapıda kullanılan kireçtaşı bloklardan gelmektedir. Az miktarda olan parçacıklar da doğal kaynaklardan gelmiştir ve bunlar yuvarlak köşelidirler. Kireçtaşı agrega miktarları, örnekten örneğe farklılık göstermektedir. Diğerleri, çoğunlukla kuvars, kuvarsit, feldspat ve volkanik taş parçacıklarıdır. Seyrek miktarda görülen diğer mineraller, plajjoklas, piroksen, biyotit ve opak demir oksit mineralleridir. Tuğla kırıkları ile tuğla tozu, yapay puzolanik katkı olarak eklenmiştir. Birçok feldspat parçacığı farklı şekillerde bozulmaya uğramış, kil ve karbonatlar oluşmuş-

tur. Bozunmaya uğrayan agregalar nedeniyle, agrega ve bağlayıcı arasındaki adezyon kuvvetinin, tuğla kırığı ile bağlayıcı arasındaki adezyon kuvvetinden daha zayıf olduğu görülmüştür. Tuğla kırığı parçacıklarının etrafında ve yüzeyinde jel oluşumu gözlenmiştir. Puzolanik özellik sayesinde oluşan jel formu ile bağlayıcı ve tuğla kırığı parçacıkları arasında iyi bir adezyon olduğu tespit edilmiştir. Harç örneklerinde kızdırma kaybı deneyi ile belirlenen CaCO_3 miktarı ile DTA ve ICP analizlerinin sonuçları birlikte değerlendirilmiştir. Tablo 6’da görülen harç örneklerinin ICP analizi sonuçları ile tuğla kırığı miktarları arasında korelasyon kurulmuştur. Harç örneklerinin tuğla kırığı miktarlarındaki artış, alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3), baryum (Ba) ve zirkonyum (Zr) miktarlarının da oransal olarak artmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, asit kaybı ve elek analizi, kızdırma kaybı ve petrografik analiz sonuçları ile ICP analizi sonuçları arasındaki korelasyon değerlendirilmiştir.

Tarihi kireç harçları, genelde %20-40 arası açık gözenekliliğe ve makro boyutlu gözeneklere sahip olurlar (Borelli, 1999). Onarım harçlarının da, özgün harçların tüm özelliklerine sahip olması beklenir. Porozimetri analizi sonucunda, ortalama boşluk boyu-

tu 0.34 μm olarak bulunmuştur; bu da tarihi harçlar için kabul edilebilir bir değerdir. Horasan harçları, surlarda çok geniş bir alanda kullanılmış olduğundan, karışımlarının homojen olmaması doğaldır. Ayrıca harçlar, uzun yıllar boyunca iklimsel değişikliklerin yol açtığı etkilere ve farklı yükler altında oluşan mekanik bozulmalara maruz kaldıklarından, heterojen davranışlar göstermektedirler.

M1 ve M3 kodlu harç örnekleri, denizden gelen su buharı nedeniyle sıkça ıslanma-kuruma döngülerine maruz kaldıklarından, suda çözünen tuzlar yağmur suyu ile yıkanamamış ve içeride kalmışlardır (Tablo 2). Bu örnekler, tuzların harcın yüzeyinde ve iç yapısında birikmesi ve kristallenmesi (çiçeklenme hasarı) nedeniyle oluşan basıncın etkisinde kalarak bozulmuşlardır. T4 kulesinin farklı bölümlerinden alınan örneklerde, deniz kaynaklı olarak gelen Cl^- iyonlarına bol miktarda rastlanmıştır. İçerden ve daha korunaklı bölümlerden alınan örneklerde de, büyük miktarlarda deniz suyu ve hava kirliliği kaynaklı suda çözünen tuzlar tespit edilmiştir. Suda çözünen tuzlar, harç yüzeylerinden emilerek iç yapıya kadar ulaşmış ve gözeneklerde birikmiş olarak, SEM-EDX analizleri ile belirlenmiştir.

5. Genel Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, İstanbul Kara Surları’nın T4 kulesine ait harç örneklerinin tüm özellikleri belirlenmiştir. Buna göre, harçlarda, bağlayıcı olarak sönmüş kireç, agrega olarak da tuğla kırığı parçaları, tuğla tozu, kireçtaşı parçacıkları ve dere kumu kullanıldığı belirlenmiştir. Bağlayıcı/agrega oranlarının 1/2 ve 1/3 arasında değiştiği ve agregaların %50’si-

nin tuğla kırığı, %50’sinin de kireçtaşı parçacıkları ve dere kumu olduğu bulunmuştur. Burada bulunan tuğla tozunun yapay puzolan olarak davrandığı ve harçlara hidrolik özellik kattığı görülmüştür. Bu hidrolik özellik, DTA, ICP, XRD ve SEM-EDX analizlerinde de belirlenmiştir. Harçlarda yapılan suda çözünen tuzların analizleri sonucunda bulunan tuzların, deniz ve hava

kirliliği kaynaklı olduğu söylenebilmektedir. Fiziksel ve mekanik özellikler ile boşluk boyutu dağılımı değerlerinin bulunması, üretilecek onarım harcı için önemli görülmektedir. Özgün harçların poroziteleri %22-38 arasında değişmektedir ve çoğunluğu, makro boyutlu gözenekler oluşturmaktadır. Basıncı dayanımı değerleri ise, 4-6MPa aralığında bulunmuştur.

REFERANSLAR

- 1- Ahunbay, Z., Ahunbay, M., Ersen, A., Gürdal, E., Acun, S., Gülec, A., 2003, 'Research on the Characterization and Deterioration of the Stones, the Bricks and the Khorasan Mortars of the Tower 4 (T4) of the Land Walls of Istanbul (Constantinople)', *Unpublished Fortmed Project Report submitted to project manager in Venice*, EC Project no: ICA 3-CT-1999-00.
- 2- Gülec, A., Ersen, A., 1998, 'Characterization of Ancient Mortars: Evaluation of Simple and Sophisticated Methods', *Journal of Architectural Conservation*, Vol.4, No.1, March, pp.56-67.
- 3- Gülec, A., Tulun, T., 1997, 'Physico-Chemical and Petrographical Studies of Old Mortars and Plasters of Anatolia', *Cement and Concrete Research*, Vol.27, pp.227-229.
- 4- Gülec, A., 1990, 'Characterization of Mortars and Plasters of Some Historic Monuments, Part II', NATO, CCMS Plot Study, Conservation of Historic Brick Structures, *4th Expert Meeting Proceedings Book*, Amersfoort, 25-27 October 1990, pp.121-154.
- 5- Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., 2000, 'Criteria and Methodology for Restoration Mortars Compatible to the Historic Materials and Structures', *Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 19-24 June 2000, Venice, pp.403-411.
- 6- Charola, A.E., Dupas, M., Shery, R.P., Freund, G.G., 1984, 'Characterization of Ancient Mortars, Chemical and Instrumental Methods', *Proceedings of the International Symposium on Scientific Methodologies Applied to Works of Art*, Florence.
- 7- TS 699, 1987, *Standard Test Methods for Natural Stones*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- 8- ASTM C 50, 1999, *Standard Practice for Sampling, Sample Preparation, Packaging and Marking of Lime and Limestone Products*, American Standards.
- 9- Borelli, E., 1999, *ARC Laboratory Handbook*, Conservation of Architectural Heritage, Historic Structures and Materials, ICCROM, Rome.
- 10- Gülec, A., Acun, S., Ersen, A., Gürdal, E., 2003, 'Evaluation of Konya Region Volcanic Tuff as a Pozzolanic Additive in Conservation Mortar', *International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones (IMBS)*, Istanbul, Turkey.