

**İSTANBUL'DA BULUNAN ERKEN BİZANS
DÖNEMİ DİNİ YAPILARINDA KULLANILAN**

HORASAN HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

*The Investigation of the Properties of the
Khorasan Mortars Used in Early-Age
Byzantine Religious Buildings in Istanbul*

Prof. Dr. Erol GÜRDAL

Istanbul Teknik Üniversitesi / gurdale@itu.edu.tr

Gülçin KAHRAMAN ALTAŞ

Istanbul Teknik Üniversitesi / gulcinkah@hotmail.com

Dr. Seden ACUN ÖZGÜNLER

Istanbul Teknik Üniversitesi / acunsed@itu.edu.tr

Tarihi yapıların restorasyonunda doğru malzemelerin seçimi, yapıda kullanılan orjinal malzemelerin bilimsel analiz sonuçlarına bağlı olarak yapılmalıdır. Bu amaçla yapılan çalışmada, İstanbul'da yer alan bazı Erken Bizans Dönemi dini yapılarında kullanılan tarihi harçlar fiziksel, kimyasal, mekanik ve petrografik özellikleri ile agrega boyut dağılımlarını gösteren elek analizi ve suda çözünen tuz analizleriyle birlikte incelenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre, bu harçların iyi basınç dayanımına sahip, kalsiyum silikatlı bileşikler içeren, Roma harçlarının bir karakteri olan puzolanik özellikli, sağlam bağlayıcı kompozisyonlu, iyi bağlayıcı-agrega ara yüzeyine sahip horasan harçları olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Horasan harcı, Bizans dönemi, harç karakterizasyonu, mikro yapı analizleri

The choice of appropriate materials for restoration of historical buildings depends on scientific data obtained from the analyses of materials used for the original construction. In this study, historical mortars taken from some religious monuments of Early Byzantine Period in Istanbul, were studied with physico-chemical property tests, mineralogical composition, grain size distribution analyses, compression strength and water soluble salt analysis. Analyses showed that these are khorasan mortars and they have good compression strengths. In the chemical analyses, calcium silicate hydrate (CSH) compounds have been seen. Also, they have pozzolanic characteristics like Roman mortars and they have strong binder cohesion, perfect binder-aggregate bond.

Keywords: Khorasan mortar, Byzantine period, mortar characterization, microstructural analyses.

1. GİRİŞ*

Tarihi harçları incelemek, eski anıt ve yapıların konservasyonunda harç karakterleri, harçların tarihi ve o dönemin yapım teknikleriyle ilgili önemli bilgiler vermektedir. Tarihi yapıların onarımında aynı tarihli, aynı stilde olan yapıların birbirine benzediği düşünülüp daha önce yapılmış analizlerle ilgili bilgiler ve belgeleri herhangi bir yeni yapının restorasyonunda kullanmak doğru sonuç vermez. Her yapının kendine özgü bir yapım tekniği ve malzemesi vardır. Harçlarda doğru bir bilimsel çalışma için farklı analizlerin yapılması, sonuçların belirlenmesi ve tam bir analitik rapor hazırlanması gerekmektedir. Tarihi yapıların onarımında o yapıda kullanılmış olan orijinal bağlayıcı, agrega ve katkılara uygun malzemeler kullanılmalıdır.

Constantinus, İstanbul'u bir Hristiyanlık başkenti yapmak istiyordu. Bunun sonucunda 337 yılında kilise ve imparatorluk gücü birbiriyle ilişkili hale gelmiştir. Bu güç iki farklı yapı

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Harçların morfolojik özellikleri, fiziksel özellikleri, hammadde kompozisyonları, kimyasal özellikleri, mineralojik karakterleri deneysel sonuçlara göre belirlenmiştir. Morfolojik analizlerde tüm harç örneklerinin tuğla tozu ve tuğla kırıklı bazılarının ise çakıl agrega içeren horasan harçlarıdır. Ayasofya ve Aya İrini'den alınan örnekler sadece tuğla agrega içermektedir.

3.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Harç örneklerinin fiziksel özellikleri; atmosfer basıncında su emme, birim hacim kütle ve özgül kütle değerleri, TS 699 standardına uygun olarak yapılan deneyler ile belirlenmiştir. Deney sonuçlarına bağlı olarak kütlece ve hacimce su emme yüzdeleri, birim hacim kütlesi, özgül kütle ve görünen ve gerçek porozite değerleri hesaplanmış, sonuçlar Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Harç örneklerinin fiziksel özellikleri

Örnek Numarası ve Adı	Sk (%)	Sh (%)	Δ (gr/cm ³)	δ (gr/cm ³)	P (%)
D10- Aya İrini derz harcı	36	48	1,35	2,57	48
D18- Acem Ağa Mescidi dolgu harcı	19	32	1,63	2,41	32
D17- Euphemia Kilisesi derz harcı	22	34	1,58	2,50	37
A3 - Studios Manastırı dolgu harcı	31	43	1,40	2,63	46
D13- Studios Manastırı derz harcı	36	47	1,30	2,58	49
D6- Karpos Papylos Martyrionu derz harcı	21	34	1,64	2,51	35
D7- Karpos Papylos Martyrionu dolgu harcı	20	32	1,65	2,49	34
D3- Hagios Polyektos dolgu harcı 1	19	32	1,66	2,55	35
D4- Hagios Polyektos dolgu harcı 2	42	51	1,23	2,53	52
D5- Hagios Polyektos derz harcı	29	43	1,46	2,66	45

Sk: Kütlece su emme oranı (%) Sh: Hacimce su emme oranı (görünen porozite) (%)
 Δ : Birim hacim kütlesi (g/cm³) δ : Özgül kütle (g/cm³) p: Gerçek porozite (%)

tarzını beraberinde getirmiştir; kenti Hristiyanlaştırmak için en uygun mekan biçimi olan Roma bazilikası ve kilisenin kitleleri etkileyebilmesi için din adamlarının şehit olması ve Hz.İsa'yla ilgili bilgilerin anlatıldığı dinsel yapı tipi olan martyronlar görülmektedir. Bu çalışmada, İstanbul'da bulunan Erken Bizans Dönemi dini yapıları; Ayasofya, Aya İrini, Acem Ağa Mescidi (Theotokos Khallopratea kilisesi), Euphemia kilisesi, Studios Manastırı (İmrahor Camii), Karpos-Papylos Martyrionu ve Hagios Polyektos yapıları incelenmiştir.

2. ÖRNEK ALMA ÇALIŞMALARARI

İncelenen yapılar tarihsel süreç içinde çeşitli onarımlar geçirmiştir. Bu nedenle bu yapılar hakkında yapım dönemine özgün yerleri bulabilmek doğru yerlerden temsili örnekler alabilmek için detaylı bir literatür çalışması yapılmıştır. Alınan örneklerde fiziksel, kimyasal, petrografik özellikleri ile hammadde kompozisyonları mineralojik özellikleri ve suda çözünen tuz anazileriyle birlikte incelenmiştir.

Yapılardan alınan örneklerin fiziksel özelliklerinde görülen ortalama değerlere baktığımızda (Tablo 1) örneklerin kütlece su emme yüzdesi % 19–42, birim hacim kütlesi 1,23–1,66 g/cm³ arasındadır. Harçların gerçek porozite oranları genel olarak % 32–48 arasında değişmektedir. Horasan harçlarının boşluklu yapıya sahip olması ve hava alması özellikleri ile donma sırasında harcın hacmindeki büyüme nedeniyle oluşacak röt ve çatlaklara karşı dayanıklıdır. Analiz sonuçlarında görülen gerçek porozite değerleri tarihi yapılarıdaki horasan harçlarında görülen değerlere eş değerdedir.

3.2. Basit Kimyasal Özelliklerin Belirlenmesi ve Suda Çözünen Tuzların Analizleri

Yapılardan alınan örneklerde harçların kimyasal özellikleri, hammadde kompozisyonlarını, karbonat miktarlarını, hidroliklik-puzolanlık özelliklerini ve agrega morfolojisini tespit etmek için asit kaybı analizi, asit kaybı analizi sonunda kalan agrega üzerinde elek analizi, kızdırma kaybı analizleri, protein, yağ, tuz, pH, puzolanlık testleri uygulanmıştır.

*Bu çalışma Erken Bizans Dönemi Horasan Harçlarının İncelenmesi isimli yüksek lisans tez çalışmasından yararlanılarak hazırlanmıştır.

3.2.1. Asit Kaybı Analizi

Harç örneklerinde yaklaşık %10-14 oranda seyreltilmiş HCl kullanılarak asit kaybı analizi yapılmıştır. Asit kaybı analizi sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de gösterilmiştir.

Erken Bizans dönemi horasan harçlarında yapılan asit

3.2.2. Elek Analizi

Asit kaybı analizi yapılan örneklerde çözünmeden kalan kısımdan agreg granülometrisi ve agreg tipini belirlemek için 16 mm. ile 125 µm.'lik ISO 565 serisi elekler kullanılarak elekten geçen malzeme yüzdesi hesaplanmış ve Tablo 3'de bulunan değerler gösterilmiştir.

Tablo 2: Asit kaybı deneyi sonuçları

Örnek Numarası ve Adı	İlk Kütle Kuru (g)	Kalan İnce Malz. (g)	Kalan Kaba Malz. (g)	Kalan Toplam Malz. (g)	Asitte Kayıp (%)	Bağlayıcı/ Agreg Oranı
D41- Ayasofya derz harcı	35,80	6,40	21,99	28,39	20	1/4
D42- Ayasofya sıva harcı	39,21	4,78	19,72	24,50	37	1/2
D10- Aya İrini derz harcı	69,72	5,24	50,84	56,08	20	1/4
D18- Acem Ağa Mescidi dolgu harcı	59,63	2,70	45,27	47,97	20	1/4
D40- Acem Ağa Mescidi derz harcı	58,85	1,91	45,14	47,05	20	1/4
D17- Euphemia Kilisesi derz harcı	46,47	2,92	31,64	34,56	26	1/3
A3 - Studios Manastırı dolgu harcı	30,34	3,69	15,5	19,19	37	1 / 2
D13- Studios Manastırı derz harcı	42,33	3,55	20,65	24,2	43	1/1,5
D6- Karpos Papylos M. derz harcı	57,14	1,52	46,28	47,8	16	1/5
D7- Karpos Papylos M. dolgu harcı	48,54	2,03	35,5	37,53	23	1/3
D3- Hagios Polyuktos dolgu harcı 1	54,65	2,4	37,84	40,24	26	1/3
D4- Hagios Polyuktos dolgu harcı 2	36,65	5,51	22,67	8,18	23	1/3
D5- Hagios Polyuktos derz harcı	50,72	1,7	37,93	39,63	22	1/3,5

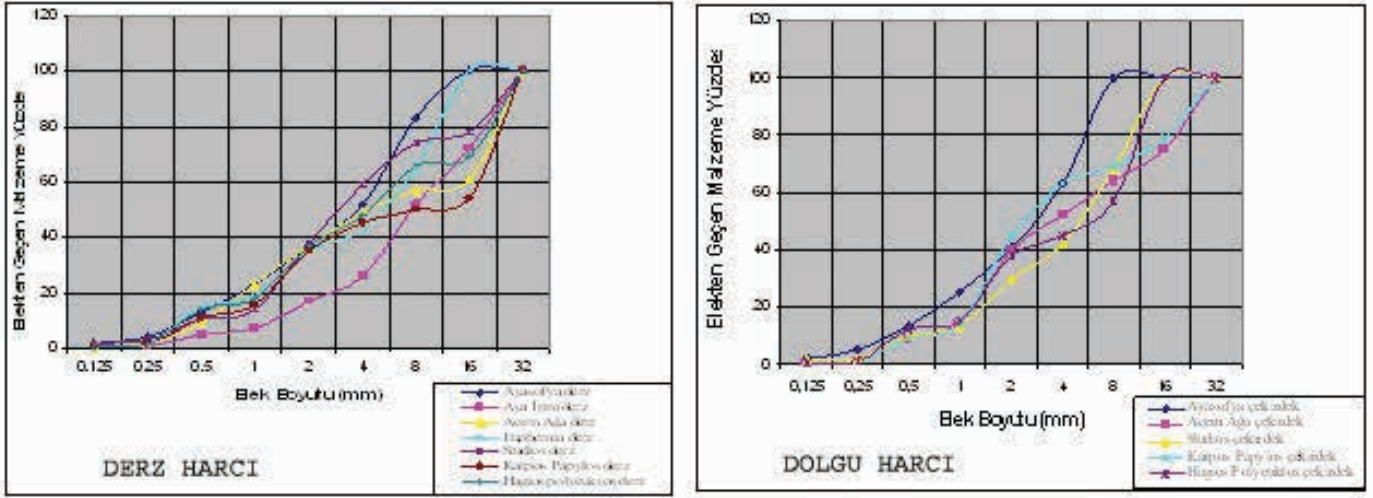
Tablo 3: Elekten geçen malzeme yüzdesi

Örn. No	32 mm %	16 mm %	8 mm %	4 mm %	2 mm %	1 mm %	0.5 mm %	0.25 mm %	0.125 mm ve altı %
D41	100	100	83	52	37	23	13	4	2
D42	100	100	100	63	41	25	13	5	2
D10	100	72	52	26	17	7	5	1	0,7
D18	100	75	64	52	40	14	9	1	0,3
D40	100	61	57	49	37	23	9	2	1
D17	100	100	65	43	35	19	15	2	1
A3	100	100	68	42	30	13	10	2	2
D13	100	78	74	59	38	14	11	3	2
D6	100	54	50	45	35	16	11	2	1
D7	100	79	69	63	45	14	9	1	0,3
D3	100	100	57	45	38	15	12	1	0,5
D4	100	100	73	43	28	12	9	2	1
D5	100	69	66	48	37	18	14	2	1

*Örnek numaralarına karşılık gelen yapı adları Tablo 2'de verilmiştir.

kaybı analizinde bağlayıcı/agrega oranı 1/2 ile 1/4 arasında görülmektedir. Bu oran tarihi yapılarda kullanılan benzer oranlardır. Agreg oranı %57-80 arasında bulunmuştur, yani bağlayıcı oranı %20-43 arasındadır. Bununla birlikte bazı yapılardan alınan harç örnekleri çok serttir, hatta asitte çözünmeleri çok zor olmuştur. Bu yapıların asit kaybı analizinden sonra kalan agregaları incelendiğinde, Şekil 11'de tuğla ile iyi bağ kurmuş kireç varlığı ve silikatlaşmış bir ara yüzey görülmektedir. Bu nedenle 1/4 -1/5 arasında çıkan oranlarda silikatlaşma nedeniyle bu oranın 1/3 arasında olabileceği düşünülmektedir.

Agregaların yoğunlukları kullanıldıkları amaçlara göre değişmektedir. Örneğin dolgu harçlarında daha iri agregalar görülmektedir. Sıva harçlarında ise ince agregalar bulunmaktadır. Tuğla kırığı harçtaki mekanik dayanımı ve puzolanik hidrolik reaksiyonları artırmaktadır. Kırılmış tuğla kırığı varlığı Roma ve Bizans dönemi yapılarının bir özelliğidir. Bu yapılardan alınan örneklerde yüksek miktarda tuğla kırığı ve harca kırmızı rengini veren tuğla tozu görülmüştür, agregalar homojen olarak dağılmıştır. Bazı örneklerde dere kumundan ileri gelen mika, kuvars ve çakıl taneleri tespit edilmiştir.



Şekil 1 ve 2. Dini yapılardan alınan derz ve dolgu harcı örneklerinin agrega granülometri eğrisi

3.2.3. Kızdırma Kaybı Analizi

Yapılardan alınan harç numunelerinde bağlayıcı kompozisyonları, harçların nem ve karbonat miktarları, hidrolik özellikleri Tablo 4'te kızdırma kaybı değerleriyle birlikte verilmiştir. Horasan harçlarında 200–600 °C arasında kireç ve tuğla ara yüzeylerinde bulunan hidrolik ürünlerin dekompozisyonunda kimyasal su kaybına ve 600–900 °C arasında ise karbonatlaşmış kirecin kalsinasyonu ile karbondioksit (CO₂) kaybına bağlı olarak ağırlık azalmaları meydana gelmektedir. Bu sonuçtan hareketle CO₂ / kimyasal su oranı 10'dan düşük ise harç hidrolik, 10'dan fazla ise hidrolik olmadığı sonucuna varıldığı literatürde gösterilmiştir.. 1050

°C'deki kızdırma kaybı / 550 °C'deki kızdırma kaybı oranından harcın hidrolikliği tespit edilmiştir. Örnekler 0,9–6 oranında değerlere sahip olup, hidrolik özellik taşımaktadırlar. Harcın hidrolikliği, puzolanlık özellik taşıdığını ve yüksek mekanik dayanıma sahip olduğunu göstermektedir.

Erken Dönem horasan harçlarının karakterizasyonu açısından baktığımızda puzolanik ve hidrolik özellikli harçlar olduklarını bize göstermektedir, puzolanik özellik ya agrega olarak kullanılan tuğla kırığı ve tuğla tozundan ya da puzolanik katkılardan gelmektedir. Bu analizlerin sonuçları diğer bölümlerde göreceğimiz ileri teknik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır.

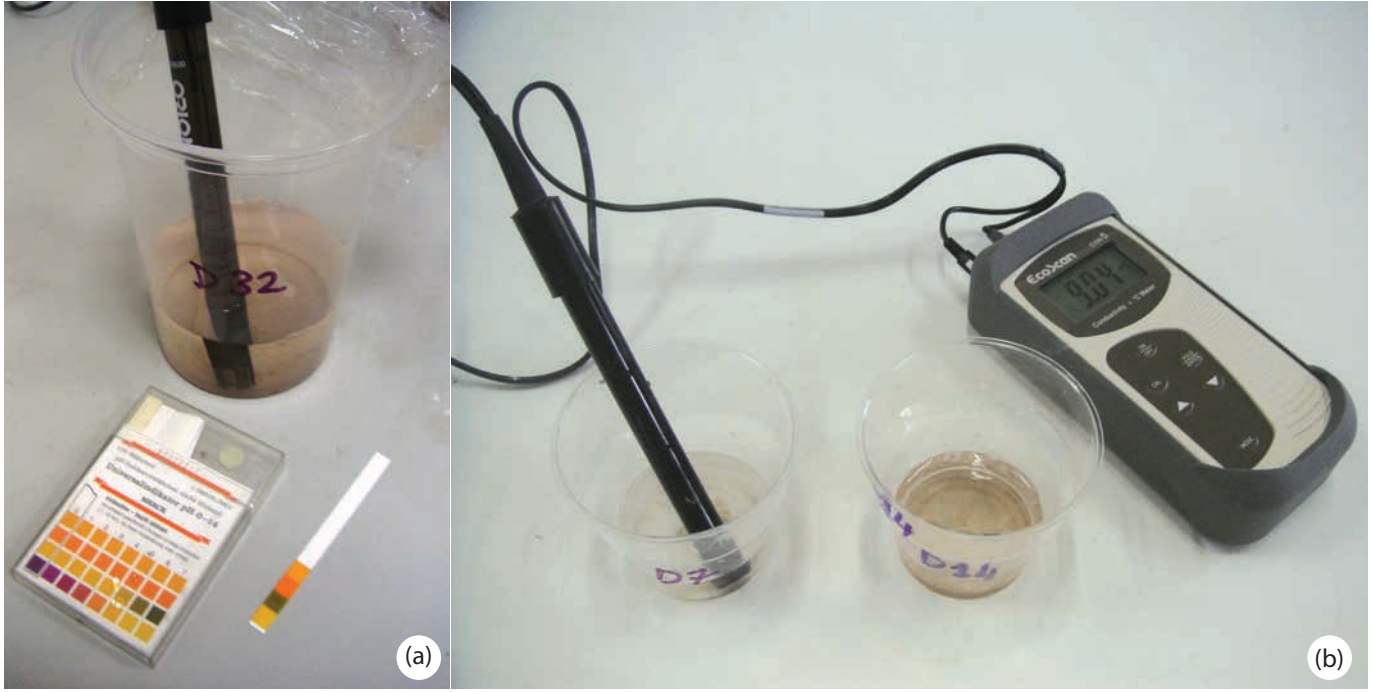
Tablo 4: Kızdırma kaybı analiz sonuçları

Örnek Numarası ve Adı	105 °C'deki Kayıp (%)	550 °C'deki Kayıp (%)	1050 °C'deki Kayıp (%)	CaCO ₃ Miktarı (%)	Hidrolik Özellik Değeri
D41- Ayasofya derz harcı	8,06	8,48	7,96	18,10	0,9
D42- Ayasofya sıva harcı	1,77	6,17	17,11	38,89	2,8
D10- Aya İrini derz harcı	11,94	3,49	10,09	22,94	2,9
D18- Acem Ağa Mescidi dolgu harcı	0,46	1,67	9,32	21,18	5,6
D40- Acem Ağa Mescidi derz harcı	3,85	4,10	9,82	22,32	2,4
D17- Euphemia Kilisesi derz harcı	3,10	4,46	10,62	24,13	2,4
A3 - Studios Manastırı dolgu harcı	1,36	5,32	18,10	41,14	3,4
D13- Studios Manastırı derz harcı	12,09	10,6	20,36	46,26	1,9
D6- Karpos Papylos M. derz harcı	0,67	2,94	7,81	17,74	2,7
D7- Karpos Papylos M. dolgu harcı	0,91	2,53	9,46	21,31	3,7
D3- Hagios Polyeyuktos dolgu harcı 1	1,76	3,65	10,80	24,54	3,0
D4- Hagios Polyeyuktos dolgu harcı 2	9,58	4,88	10,27	23,34	2,1
D5- Hagios Polyeyuktos derz harcı	1,05	4,32	10,73	24,33	2,8

3.2.4. Protein, Yağ, pH ve Puzolanik Aktivite Analizler

Yapılardan alınan örneklerde organik katkı maddelerini tespit etmek için protein ve yağ testleri yapılmıştır. pH değerlerine bakılarak da kirecin kuvvetli baz olmasından dolayı harçların zayıf baz özellik taşıdığı görülmektedir. Bu analiz sonuçlarında protein ve yağ izine rastlanmadığı sadece D40 numaralı Acem Ağa derz harcında protein olduğu görülmüştür. Harçlarda puzolanik aktivite deneyi elektrik iletkenliklerinin

ölçülmesiyle tespit edilmiştir. Tablodaki sayısal değerlere göre puzolanik aktivitenin $>0,4$ mS/cm olması puzolanik olduklarını göstermektedir. Euphemia Kilisesi ve Studios Manastırı'nda puzolanik aktivite değeri 0,4–1,2 mS/cm aralığında yer alması puzolanik özellikli olduğunu, Ayasofya, Aya İrini, Hagios Polyektos'ta 1,2 mS/cm değerinden büyük olduğu için de bu yapıların harçlarını iyi puzolan özellikli olarak nitelendirebiliriz. Analiz sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 3. Harç numunesinin a) pH ve b) puzolanik aktivite analizinin yapılması

Tablo 5: Protein, yağ, pH ve puzolanik aktivite deney sonuçları

Örnek Numarası ve Adı	Protein	Yağ	pH	Puzolanik Aktivite mS/cm
D41- Ayasofya derz harcı	-	-	7,70	1,43
D42- Ayasofya sıva harcı	-	-	7,98	1,72
D10- Aya İrini derz harcı	-	-	8,00	1,36
D18- Acem Ağa Mescidi dolgu harcı	-	-	8,12	0,81
D40- Acem Ağa Mescidi derz harcı	+	-	8,11	1,61
D17- Euphemia Kilisesi derz harcı	-	-	7,87	0,68
A3 - Studios Manastırı dolgu harcı	-	-	7,56	0,70
D13- Studios Manastırı derz harcı	-	-	7,40	0,78
D6- Karpos Papylos Martyrionu derz harcı	-	-	7,40	0,99
D7- Karpos Papylos Martyrionu dolgu harcı	-	-	7,82	0,90
D3- Hagios Polyektos dolgu harcı 1	-	-	8,03	1,56
D4- Hagios Polyektos dolgu harcı 2	-	-	7,98	2,68
D5- Hagios Polyektos derz harcı	-	-	7,80	0,53

3.2.5. Suda Çözünebilir Tuzların Kalitatif Analizi

Erken dönem yapılarından alınan örneklerde çözünen

3.3.1. Petrografik Analiz

Petrografik analizler polarize mikroskop aletinde incelenmiştir. Şekil 4 ve 5'de D10 no.lu Aya İrini derz harcında

Tablo 6: Suda Çözülebilir Tuzların Kalitatif Analiz Sonuçları

Örnek Numarası ve Adı	CT	SO ₄	NO ₃	CO ₃	İletkenlik (µs.)
D41- Ayasofya derz harcı	+	+++	+	-	638
D42- Ayasofya sıva harcı	++	++	++	-	832
D10- Aya İrini derz harcı	+++	+	++	-	445
D18- Acem Ağa Mescidi dolgu harcı	+	+-	+-	-	128,6
D40- Acem Ağa Mescidi derz harcı	++	+-	+	-	265
D17- Euphemia Kilisesi derz harcı	++	+-	++	-	384
D13- Studios Manastırı derz harcı	++	+++	+	-	831
D6- Karpos Papylos M. derz harcı	+	+++	+	-	4000
D7- Karpos Papylos M. dolgu harcı	+-	+++	+++	-	457
D3- Hagios Polyektos dolgu harcı 1	+++	++	+	-	420
D4- Hagios Polyektos dolgu harcı 2	++	+	+	-	199,2
D5- Hagios Polyektos derz harcı	+	++	++	-	540

*Distile su: 6,7 µs.

tuzların miktarı iletkenlik ölçümü ile bulunmuş, spot analizlerle de tuzların cinsi (klorür, sülfat, nitrat, karbonat) tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Tuz analizlerindeki sonuçlara bakıldığında deniz kenarına yakın kısımlardan alınan örnekler ile trafiğe maruz kalan bölgelerden alınan örneklerde tuz miktarı daha fazla çıkmıştır, denizden ve ana yollardan uzak iç bölgelerdeki yapılarda bu oran azalmaktadır.

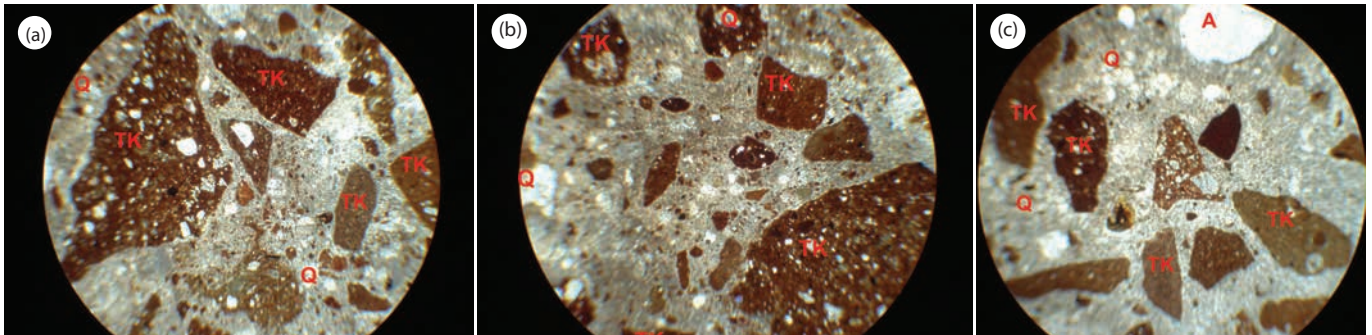
3.3. İleri Teknik Analizleri

İleri teknik analizleri, tuğla kırığı agregalı ve tuğla kırığı+dere çakılı agregalı horasan harçları olarak iki grubu temsil etmesi bakımından sadece Aya İrini ve Acem Ağa Mescidinden alınan harç örnekleri üzerinde yapılmıştır. Aya İrini ve Ayasofya'da kullanılan horasan harçları tuğla kırığı agregalı iken, Ayasofya dışındaki yapılar, Acem Ağa Mescidindeki gibi tuğla kırığı+dere çakılı agregalı horasan harçlarıdır. Her iki türdeki horasan harçlarının iç yapılarındaki farklılıkları incelemek amacıyla ileri teknik analizleri yapılmıştır.

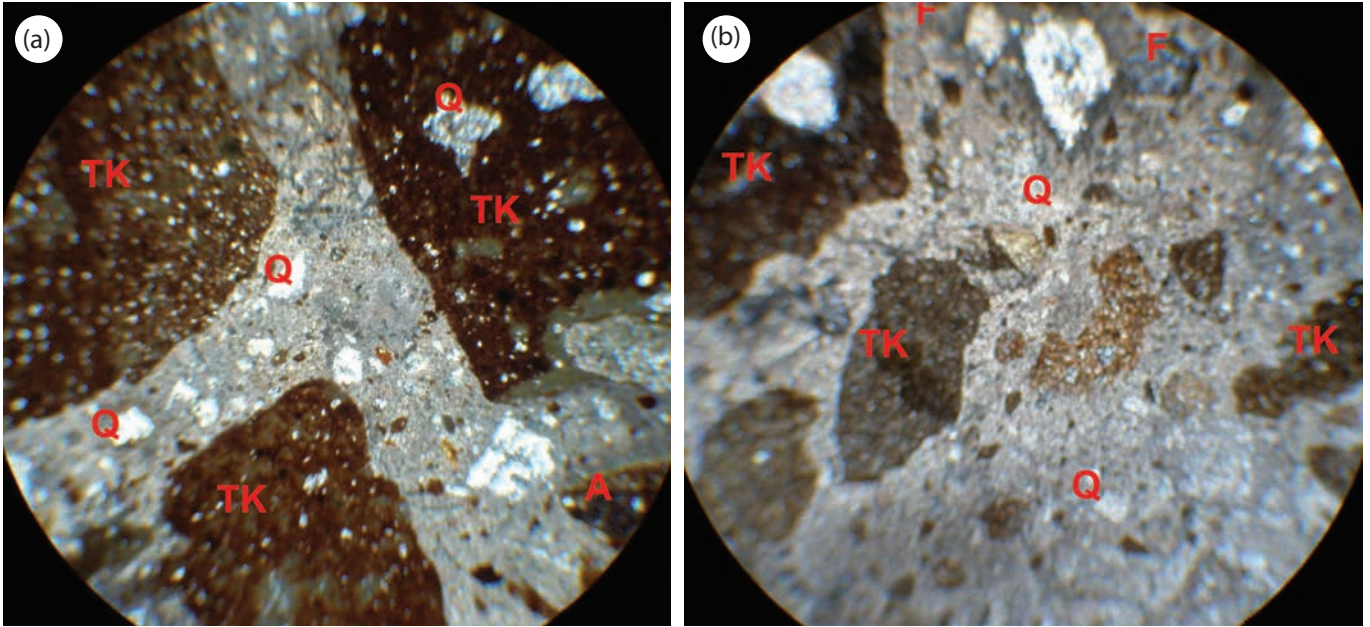
tuğla kırığının çok olduğu ve bağlayıcı ile iyi aderans kurduğu görülmektedir. Bu harçta ortoklas görülmesi de puzolanik katkı olduğunu göstermektedir, XRD analiz sonuçlarından da harcın kalsiyum silikat hidrat (CSH) içermesi bu sonucu doğrular niteliktedir.

Bej renkli matrise sahip bu harçta, harcın bağlayıcı kısmında ve tuğla agregası da kuvars gözlemlenmektedir. Harcın içinde silisli çakıl taneleri de bulunmaktadır, feldispatın varlığı ve XRD analizinde CSH bulunması, harçta puzolanik katkı olabileceği ya da tuğla agregası ile puzolanik özellik kazandığını göstermektedir.

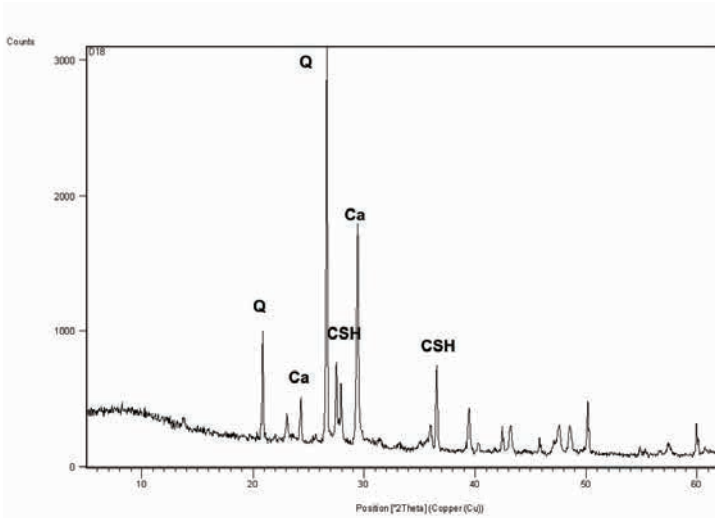
Petrografik analiz sonuçlarında tuğla kırığının baskın agregası olduğu, bununla beraber farklı renkteki agregalar ve opak mineraller içerdiği görülmüştür. Bağlayıcı matrisinde kumdan gelen kuvars mineralinin bulunduğu, bazı örneklerde de feldspat olduğu görülmüştür. Bunların kırılmış taşlardan veya



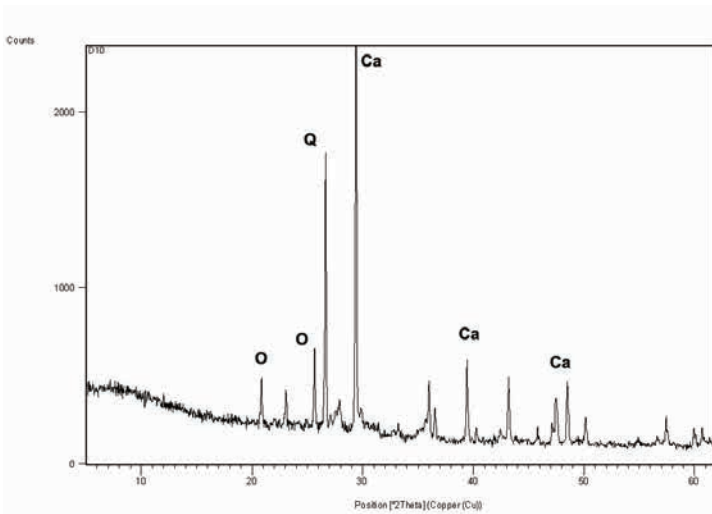
Şekil 4. D10 Aya İrini derz harcı polarize mikroskop resimleri, a) Genel doku görüntüsü, b-c) Tuğla kırığı ve matrisin ilişkisi (TK: Tuğla kırığı, Q: Kuvars, F: Feldspat)



Şekil 5. D18 Acem Ağa dolgu harcı polarize mikroskop resimleri, a) Genel doku görüntüsü, b) Tuğla kırığı ve matrisin ilişkisi (TK: Tuğla kırığı, Q: Kuvars, F: Feldspat, A: Farklı renkteki agrega)



Şekil 6. D18 no.lu Acem Ağa Mescidi dolgu harcı numunesinin X-Işını Grafiği (Ca: Kalsit, Q: Kuvars, CSH: Kalsiyum Silikat Hidrat)



Şekil 7. D10 no.lu Aya İrini derz harcı numunesinin X-Işını Grafiği (Ca: Kalsit, Q: Kuvars, O: Orthoclase)

kumdan geldiği düşünülmektedir. Tuğlaların içinde bulunan kuvars mineralleri, tuğla hamuruna katılan kumdan ve kil içeriğinden ileri gelmektedir. Kuvars, mineralinin bağlayıcı matrisinde bulunmuştur ve bu harçların asit kaybı analizinde filtre kâğıdında kalan malzemeleri incelendiğinde tüfümsü malzemeler görülmüştür. Bu sonuçlar harçlarda puzolan kullanıldığını göstermektedir.

3.3.2. X- Işını Analizi

XRD analizleri sonucunda Şekil 6, D18 Acem Ağa dolgu harcında CSH piklerinin görülmesi bu harçlarda kalsiyum silikat hidratlı bileşikler olduğunu ve puzolanik katkı taşıdıklarını göstermektedir. Aya Sofya'da yapılan çalışmalarda da bu sonuçlar tespit edilmiştir, (Şekil 7).

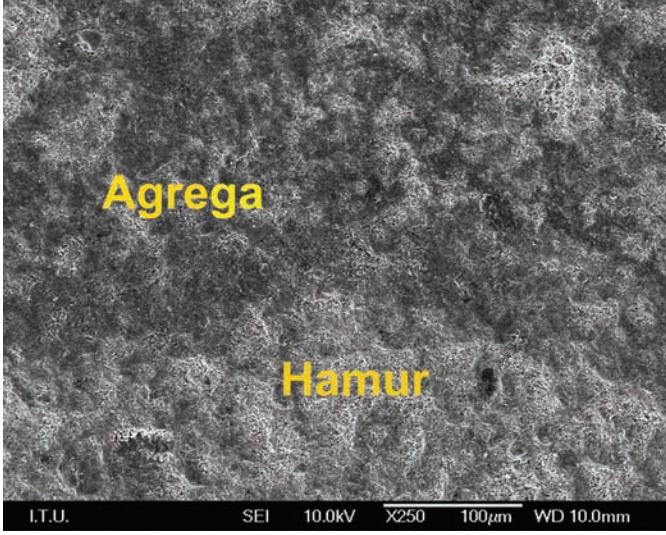
3.3.3 SEM-EDS Analizi

Bu analiz, tuğla kırığı+dere çakılı agregalı olan Acem Ağa Mescidi'nden alınan horasan harçlarının iç yapısının detaylı olarak incelenmesi amacıyla, EDS Üniteli Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Elektron Microscope) cihazı ile yapılmıştır.

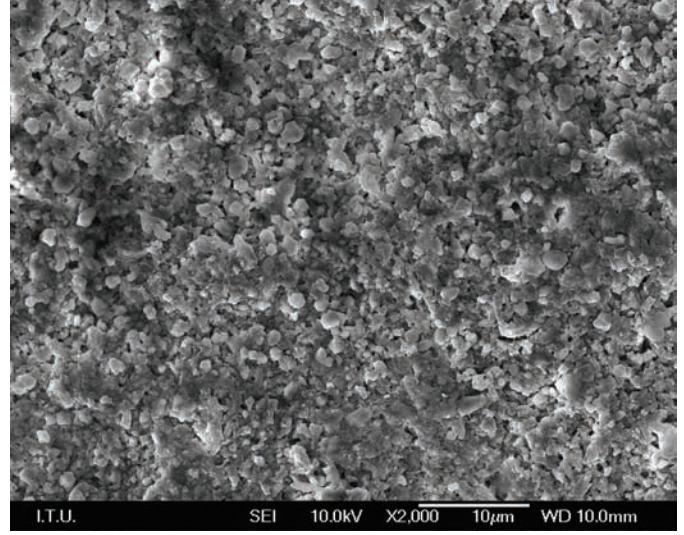
Acem Ağa Mescidi dolgu harcı örneğinin bağlayıcı kısmından 5000x büyütmede elde edilen görüntüde kalsit kristalleriyle beraber, silikatlı oluşumlar görülmektedir. Ayrıca yine Şekil 8.d'de mikro yapıdaki çatlak çevresinde karbonatlaşmış alanlar, harcın 25000X ve 30000X büyütmelerinde ise üç boyutlu kalsit oluşumları ve jelsi yapılar görülmektedir. Bağlayıcı agrega ara yüzeyinde oluşmuş olan bu jelsi yapıların

kalsiyum silikatlı bileşikler olduğunu söyleyebiliriz. Bu sonuç XRD'de CSH piklerinin görülmesiyle örtüşmektedir. Tablo 7'de görülen elementlerin yüzdeleri dağılımlarından harcın

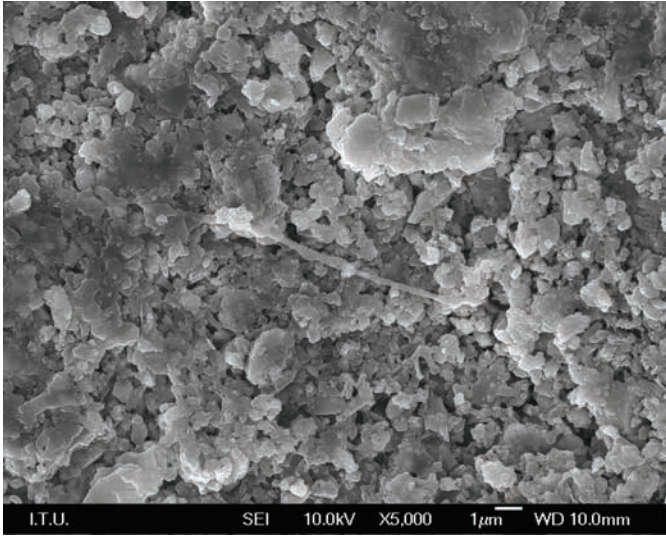
silikatlı agregalardan oluştuğu, sodyum klorür tuzu içerdiği, agregada kısmında görülen magnezyum elementinin ise kalkerli, dolomitli agregalardan kaynaklandığını söyleyebiliriz.



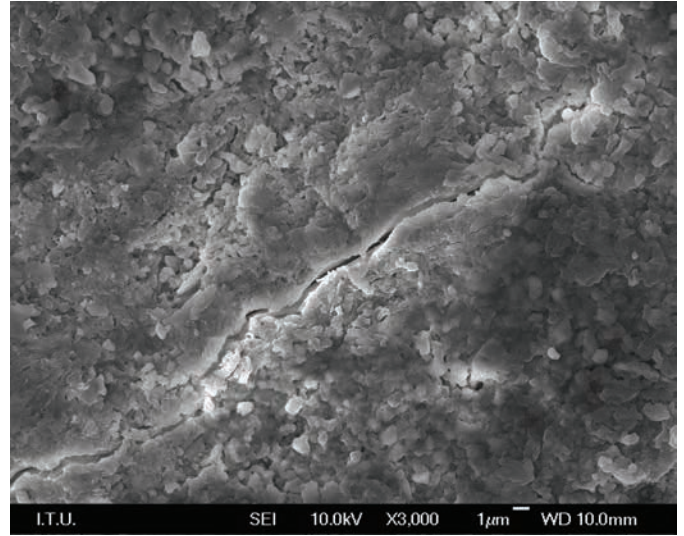
a) Genel doku 250X



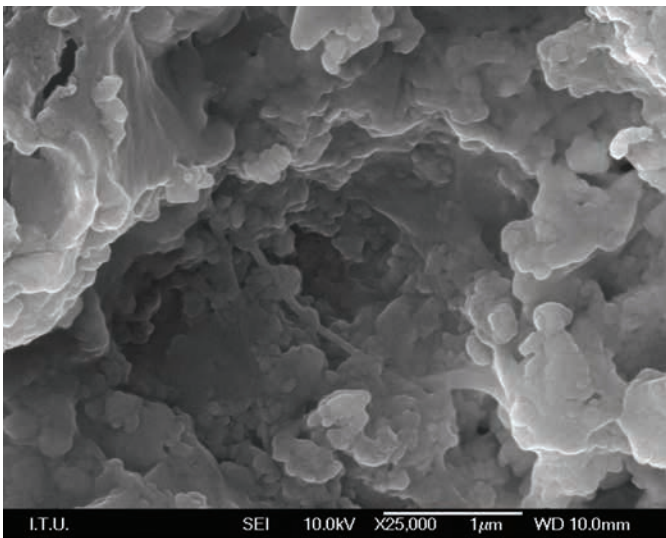
b) Agregada kısmı 2000X



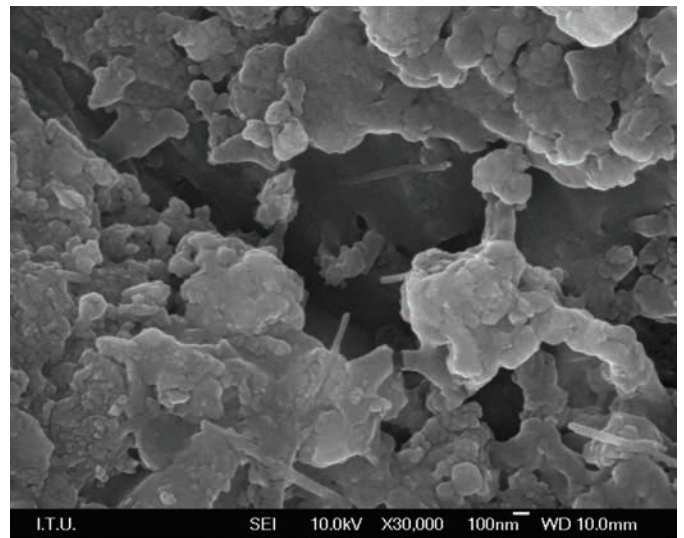
c) Bağlayıcı kısım 5000X



d) Mikro yapıdaki çatlak 3000X

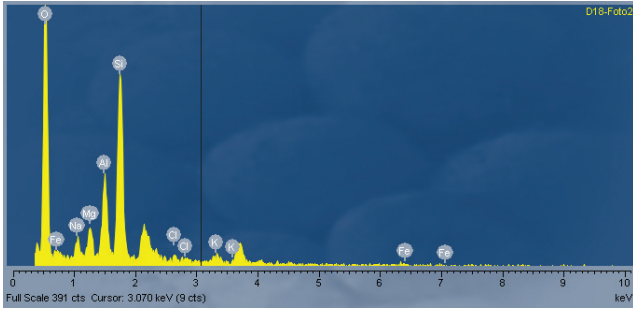


e) Bağlayıcı agregada ara yüzeyi 25000X

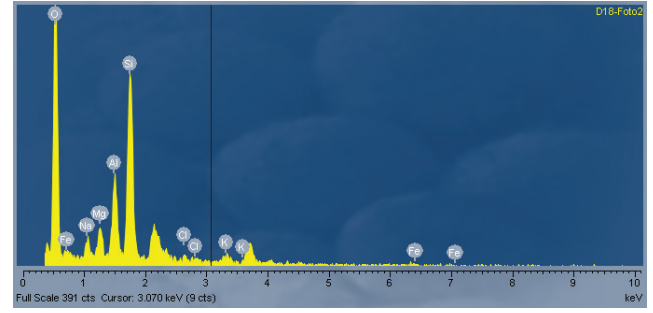


f) Bağlayıcı agregada ara yüzeyi 30000X

Şekil 8. D18 no.lu Acem Ağa Mescidi dolgu harcı örneğinin SEM görüntüleri



Şekil 9. D18 no.lu Acem Ağa Mescidi dolgu harcı örneğinin agrega kısmı EDS Diyagramı (2000X)



Şekil 10. D18 no.lu Acem Ağa Mescidi dolgu harcı örneğinin hamur kısmı EDS Diyagramı (5000X)

Tablo 7: D18 no.lu Acem Ağa Mescidi dolgu harcı örneğinin agrega ve hamur kısmından alınan EDS sonuçları

Element	Hamur kısmı EDS Sonuçları		Agrega kısmı EDS Sonuçları	
	Atom (%)	Konsantrasyon (wt,%)	Atom (%)	Konsantrasyon (wt,%)
O	73,16	57,29	63,24	48,06
Na	-	-	2,11	2,30
Mg	1,08	1,28	2,96	3,42
Al	4,38	5,79	6,69	8,57
Si	10,74	14,77	20,25	27,02
K	-	-	1,33	2,47
Ca	10,64	20,87	-	-
Cl	-	-	0,96	1,62
Fe	-	-	2,46	6,53
Toplam	100	100	100	100

3.4. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Horasan harçları çok dağılgan malzemeler olduğu için yapılarından alınan örneklerde basınç dayanımı testi yapabilmek için uygun boyutta örnek hazırlamak zor olmuştur. Bunun için örnek boyutu büyük ve daha dayanıklı örneklerden elde edilen düzgün boyutlu örnekler mekanik test cihazı ile tek eksenli basınç dayanımı testi, düzgün boyutlu olmayan örneklerde ise Nokta Yükleme (Point-Loading) metodu ile yapılmıştır. İki deneyden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak bir korelasyon değeri (10) bulunmuştur, korelasyon değerinin tespit edildiği örnekler tabloda işaretlenerek gösterilmiştir. Buna göre sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir.

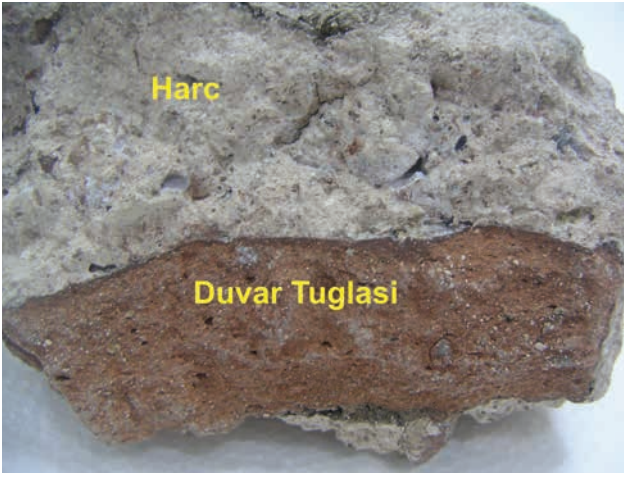
4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Erken Bizans Dönemi'ne ait İstanbul'daki dini yapılardan alınan bu harç örnekleri üzerindeki deneysel çalışma sonucunda bu harçların tuğla kırığı ve tuğla tozu agregalı, bazılarında da dere çakılı agrega kullanıldığı görülmüştür.

Erken Bizans Dönemi harçları Roma betonundan horasan harcına geçmiştir ve bu harçlar Roma'da da kullanılan puzolanik katkıları içeren hidrolik özellikli harçlardır. Bu sonuç, harçlarda yapılan analizlerle desteklenmiştir. Asit kaybı analizi sonucunda filtrede kalan tüfsü malzemelerin puzolanik katkılardan geldiği

Tablo 8: Bazı örnekler üzerinde yapılan basınç dayanımı analiz sonuçları

Örnek Numarası ve Adı	Nokta Yüklemedeki Basınç Dayanımı (MPa)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Korelasyon Değerinin Tespit Edildiği Örnekler
D10- Aya İrini derz harcı	0,5	5	
D40- Acem Ağa Mescidi derz harcı	0,5	5	*
D17- Euphemia Kilisesi derz harcı	0,6	6	
D6- Karpos Papylos Martyrionu derz harcı	0,4	4	
D4- Hagios Polyektos dolgu harcı 2	0,3	3	
D5- Hagios Polyektos derz harcı	0,3	3	*



Şekil 11 . Hagios Polyektos derz harcının yapı tuğlası ve taşıyla olan ilişkisi

görülmüştür. Yine asit kaybı analizinde 1/4-1/5 olan bağlayıcı/ agrega oranı, 1500 yıllık bir tarihi olan bu yapıların tuğla-kireç ara yüzeyinde oluşan silikatlaşma ile kirecin agrega ile iyi bir

bağ kurmasından ileri gelmektedir. Bu sonuç henüz örnek alma aşamasında yapı tuğlasının harçla birlikte birbirinden ayrılmadan kopmasıyla da görülmüştür (Şekil 11).

Kızdırma kaybı analizleri sonucunda belirlenen CO₂ / H₂O değerlerinde harçların hidrolik özellik taşıdığı, yapılan puzolanik aktivite analizinden de harçların hidrolik özellikli harçlar olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlarla birlikte XRD analizinde CSH piklerinin ve SEM görüntülerindeki jelsi yapıların kalsiyum silikatlı bileşiklerden geldiğini göstermektedir. Deneysel çalışma sonuçlarının birbirini doğruladığını ve bu özelliklerin tuğla kireç ara yüzeyinde oluşan puzolanik reaksiyonlardan ya da puzolanik katkılardan geldiği görülmüştür.

Günümüzden 15–20 yy. kadar eski olan bu harçların, uzun zaman içerisinde puzolanik özellik gösterdiği, diğer kagır malzemeler ile iyi bir adezyon sağladığı alınan örneklerden tespit edilmiştir. Erken dönem Bizans yapılarının güçlü ve sağlam harçlara sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Ahunbay, Z., Ersen, A., Gürdal, E., Acun, S., Güleç, A., Erdoğan, M. and Geçkinli, A.E. (2003). *FORTMED, Research on the characterisation and deterioration of the Stones, brick and the khorasan mortars of the Tower 4 (T4) of the Land Walls of İstanbul (Constantinople)*, İstanbul: İTÜ Yayını.
- Ashurst, J. (2007). *Conservation of Ruins*, Oxford: Elsevier Ltd.
- Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A. and Zendri, E. (1998). Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis. *Thermochimica Acta*, 321, 151-160.
- Güleç A. and Ersen, A. (1998). Characterization of ancient mortars: Evaluation of simple and sophisticated methods. *Journal of Architectural Conservation*, Vol.4, No.1, March., 56-67.
- Güleç, A., Acun, S. and Ersen, A. (2005). A Characterization method for the fifth-century traditional mortars in the Land Walls of Constantinople, Yedikule. *Studies in Conservation*, 50, 295-306.
- Hughes J.J., Leslie A. and Callebaut, K. (2001). The petrography of lime inclusions in historic lime based mortars. *Proceedings of the 8th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, Athens, Greece, p.359-364.
- Kahraman, G. (2008). *Erken Bizans Dönemi Horasan Harçlarının İncelenmesi*, İstanbul, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Livingstone, R.A. (1993). Materials analysis of the masonry of the Hagia Sophia Basilica, İstanbul. *Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings 111*, s. 15-31, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston.
- Moropoulou, A., Bakolas, A. and Bisbikou, K. (2000). Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 1, 45-58.
- Moropoulou, A., Cakmak, A., Biscontin, G., Bakolas, A. and Zendri, E. (2002). Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. *Construction and Building Materials*, 16, 543-552.
- Özkaya Ö., A., Böke, H. ve İpekoğlu, B. (2006). Roma dönemi tuğla ve harçların özellikleri: Bergama Serapis Tapınağı örneği. *3.Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, İTÜ, İstanbul, 15-17 Kasım, s. 616-627.
- Pavía, S. and Caro, S. (2008). An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material. *Construction and Building Materials*, 22, 1807-1811.
- Rampazzi, L. and Bugini, R. (2006). St. Lorenzo Basilica in Milan: integral approach to characterization of historical mortars. *Morana RTD d.o.o. Yayını*, 21-26.
- Silva, A.S., Ricardo, J.M., Salta, M., Adriano, P., Mirao, J., Candeias, A. E. and Macias, S. (2004). Characterization of Roman mortars for the historical town of Mertola. *Eduardo Torroja Institute (CSIC)*, Madrid, Spain, www.conservarcal.Inec.pt
- TS-699/T1. (2000). Tabii yapı taşları, muayene ve deney metotları, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- Velosa, A.L., Coroado, J., Veiga, M.R. and Rocha, F. (2007). Characterisation of roman mortars from Conimbriga with respect to their repair. *Materials Characterization*, 58, 1208-1216.