

İstanbul Tarihi Yarımada'da Bulunan Açık Sarnıçlar İle Valens Su Kemerini'ne Ait Harçların Özelliklerinin İncelenmesi

Examination of the Mortars Used in Construction of the
Valens Aqueduct and Open Cisterns of the
Historical Peninsula in İstanbul

Yrd. Doç.Dr. Gülçin Kahraman | İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi
Doç. Dr. Seden Acun Özgünler | İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Erol Gürdal | İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi

Tarihi yapıların restorasyonunda doğru malzemelerin seçimi, yapıda kullanılan özgün malzemelerin bilimsel analiz sonuçlarına bağlı olarak yapılmaktadır. Bu amaçla yapılan çalışmada, İstanbul'da yer alan Erken Bizans Dönemi su yapılarında kullanılan tarihi harçlar; fiziksel, kimyasal, mekanik ve petrografik özellikleri ve ileri teknik analizleriyle birlikte incelenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre, bu harçların iyi basınç dayanımına sahip kalsiyum silikatlı bileşikler içeren, puzolanik özellikli, sağlam bağlayıcı kompozisyonlu kireç harçları olduğu görülmüştür.

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

The accurate choice of the materials used in restoration of historical buildings is made depending on the scientific analysis results of those authentic materials. In this context, the mortars used in the aqueous buildings of Early Byzantine Era in İstanbul, have been examined by developed technical methods in terms of physical, chemical, mechanical and petrographical features. According to the examinations, it is understood that the mentioned mortars are of powerful binding lime mortars which have good pressure resistance with calcium silicates and pozzolonic features.

Keywords: Khorasan mortar, Byzantine Era, mortar characterisation, micro building analyses.



1. GİRİŞ

Konstantinopolis'in su ihtiyacını karşılayacak akarsu ve kaynak bulunmadığı zamanlarda sarnıçlara ve su yollarına ihtiyaç duyulmuştur (Müller-Wiener 2007: 271; Anabolu 2001: 22, 23). Valentianus 4. yy'ın sonlarında kente su getirmek için çalışmalara başlamıştır. İstanbul ili, Fatih ilçesinde yer alan Aspar, Aetios ve Mokios açık sarnıçları bu döneme tarihlendirilen su yapılarındandır (Müller-Wiener 2007: 271). Aspar ve Aetios sarnıçları Valens su hattında bu-

lunmaktadır (Mango 2006: 271). Valens (Bozdoğan) Su Kemerinde de Fatih ilçesinde bulunmakta olup bu bölgedeki sarnıçlardaki suyu şehre taşımaktadır (Forchheimer-Strzygowski 1893: 18). Kapalı sarnıçlardaki suyun halkın kullanımı için daha uygun olduğu, açık sarnıçların ise tarımsal ve endüstriyel faaliyetler için su sağladığı düşünülmektedir (Kuban 2004: 95; Altuğ 2013¹: 43). Bu sarnıçların 16. yy'da Petrus Gyllius'un İstanbul'da yaptığı araştırmalar sırasında kurumuş olduğu görülmüştür (Gyllius 1997: 22, 190).



Şekil 1.1: Konstantinopolis haritasında Aspar, Aetios, Hagios Mokios sarnıçları ve Valens su kemeri (mavi ile gösterilmiş), (wikipedia.com, 2017).

¹ Koder 2995; Downey 1957'den aktaran Altuğ 2013, s. 46.

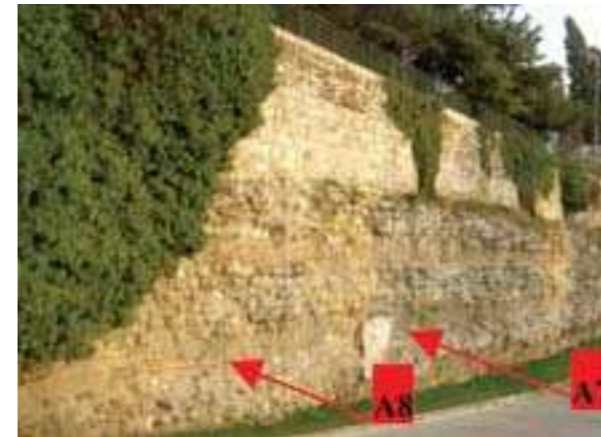
Bu makale kapsamında Aspar, Aetios ve Mokios sarnıçları ile Valens su kemerinden alınan temsili harç örnekleri üzerinde yapılmış deney sonuçları değerlendirilmiştir.

2. YAPILARA İLİŞKİN TARİHSEL BİLGİLER

İstanbul Tarihi Yarımada'da yer alan Aspar, Aetios ve Mokios açık su sarnıçları ile Valens su kemeri 5.yy'a tarihlendirilmektedir.

2.1. Aspar Su Sarnıcı

Sarnıç günümüzde Fatih İlçesi, Çarşamba semtinde, Yavuz Sultan Selim Camisi'nin güneyinde yer almaktadır. İçerisinde yapılar da bulunan ve park alanı olarak da kul-

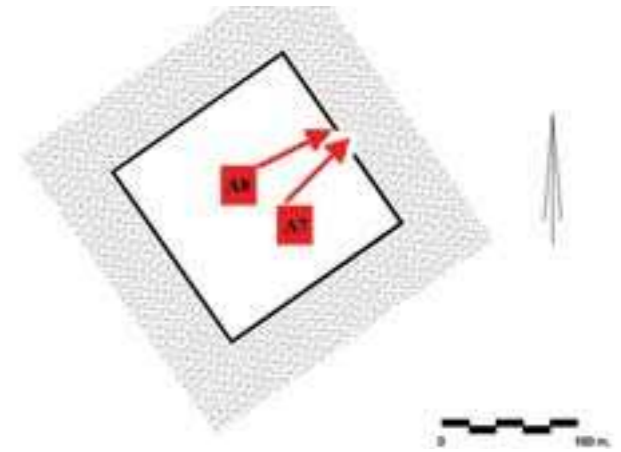


Şekil 2.2: A7 ve A8 numaralı örneklerin alındığı yerler (2007).

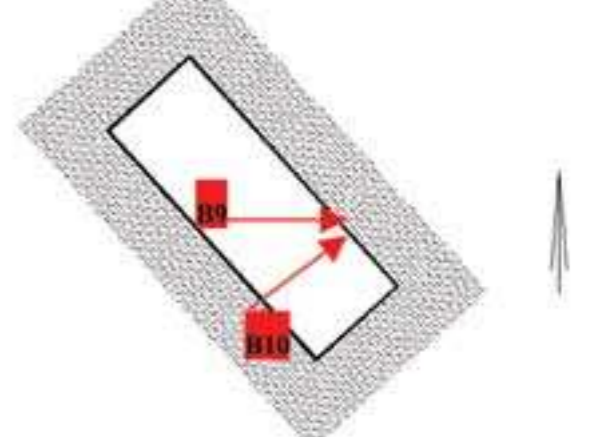
lanılan yapı harap durumdadır. Bizans ordusunda komutan olan Flavius Ardaburius Aspar ve oğulları tarafından 459 yılında Konstantinopolis'in kuzeybatısında, 152 x 152 x 11 metre boyutlarında yaptırılmış olan açık sarnıç, günümüzde de Aspar Su Sarnıcı olarak adlandırılmaktadır (Forchheimer-Strzygowski 1893: 47; Kuban 2004: 95, 96; Müller-Wiener 2007: 279; Yerasimos 2011: 59). 230.000-250.000 metreküp su almakta olan sarnıç yapısı, tuğla hatıllı ve kesme taş örgü tekniğiyle yapılmıştır. 16. yy'da Sultan Selim Camisi yapılırken, sarnıç kuru durumdadır (Gyllius 1997: 22; Müller-Wiener 2007: 279). Bu çalışma kapsamında incelenen A7 ve A8 numaralı örneklerin alındığı yerler Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.4: B9 ve B10 (Aetios Su Sarnıcı derz harcı) numaralı örneklerin alındığı yerler (2007).



Şekil 2.1: A7 (Aspar Su Sarnıcı çekirdek harcı) ve A8 (Aspar Su Sarnıcı derz harcı) numaralı örneklerin alındığı yerler.



Şekil 2.3: B9 (Aetios Su Sarnıcı çekirdek harcı) ve B10 (Aetios Su Sarnıcı derz harcı) numaralı örneklerin alındığı yerler.



2.2. Aetios Su Sarnıcı

Yapı Fatih ilçesi, Karagümrük Sırtı'nda, Fevzi Paşa Caddesi üzerinde yer almaktadır. 421 yılında Valentinianus dönemi komutanlarından Aetius tarafından yapılmıştır (Kuban 2004: 95, 96; Müller-Wiener 2007: 278; Yerasimos 2011: 59). Sarnıcın ölçüleri 244 x 85 x 15 metre, su kapasitesi ise 250.000-300.000 bin metreküptür. Edirnekapı'ya (Kharsios Kapısı) 300 metre uzaklıkta olan ve şehre su sağlayan sarnıç 16. yy'da kullanılmayıp bostan olarak işlev görmüştür (Müller-Wiener 2007: 278). 1962 yılında da genişletilerek, bu dönemden itibaren futbol sahası olarak kullanılmaktadır. Günümüzde Vefa Stadyumu'nun sınırlarını oluşturan sarnıç duvarlarından alınan örnek yerleri Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de gösterilmiştir.

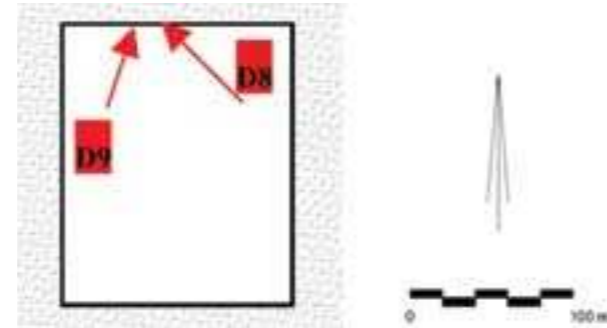
2.3. Hagios Mokios Sarnıcı

Sarnıç Fatih ilçesi, Cerrahpaşa semtinde yer almaktadır. Bir dönem bostan olarak kullanılmış olan yapı, günümüzde Altımermer Çukurbostanı olarak bilinmektedir (Eyice 2006). İmparator I. Anastasios tarafından yapılmış olan sarnıç adını da yakınındaki Ayios Mokios Kilisesi'nden almıştır (Kuban 2004: 95, 96; Yerasimos 2011: 59). Herakleios, suda boğulacağı kehanetinden korkarak şehirdeki bazı sarnıçları doldurtmuştur; I. Basileios tarafından sarnıçlar temizlenerek tekrar kullanılmıştır (Kuban 2004: 96). 140 x 170 x 15 m ölçülerine sahip olan yapı, tuğla hatıllı kesme taş yapım tekniğinde yapılmıştır. Aspar ve Aetios sarnıçları yakın dönemlerde inşa edildikleri için yapım teknikleri benzerdir. Mokios su sarnıcının yapım tekniği de bu yapılara benzemekle birlikte, farklı olarak sarnıç duvarlarında iki sıra korniş bulunmaktadır. Bu yapıdan alınan harç örneklerine ait yerler Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

2.4. Valens Su Kemerini

Fatih ilçesi, Saraçhane semtinde yer alan yapı, 368-373 yılında Valentinianus yönetimiyle kaba yonu kesme taş yapım tekniğiyle inşa edilmiştir (Müller-Wiener 2007: 273). 6. yy'da Avarların saldırısıyla su yolu tahrip edilmiştir, V. Constantin 767 yılında su kemerini onartmıştır. 971 metre uzunluğunda 28-29 metre yüksekliğinde olan su kemerinin bağlantılı olduğu Valens su yolu ile Büyük Saray ve Topkapı Sarayı'nın su ihtiyacını karşıladığı düşünülmektedir (Forchheimer-Strzygowski 1893; Kuban 2004: 95; Müller-Wiener 2007: 273, 274).

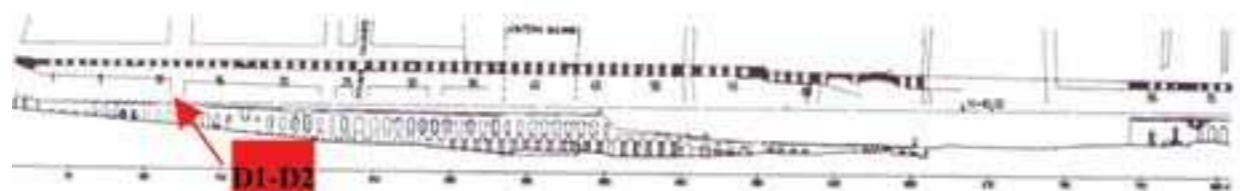
Kemer açıklıkları 4,30-5,65 m. arasında olan yapı, arazinin alçaldığı yerde iki katlı, başlangıç ve bitiminde ise bir katlıdır. Altındaki kemerler büyük taşlardan, üsttekiler ise küçük taş ve tuğlalardan yapılmıştır. Deprem ve yangınlardan zarar gören yapı birçok defa onarılmıştır. Su kemerinin 47. ve 51. kemerleri arasında eğik olarak örülmüş olan kısmının 16. yy. ortalarında yapıldığı düşünülmektedir (Müller-Wiener 2007: 273). "Yapının bugünkü zemin kotu özgün değildir, temeli ise zeminin 4,5 metre altında kalmaktadır. Temel genişliği 5,56 m. olan yapının zemin kotu üzerindeki duvar genişliği 3,40 m.'ye daralmaktadır" (Kuban 2004: 95). Şekil 2.7 ve 2.8'de yapıdan örnek alınan yerler gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Hagios Mokios Sarnıcı D8 (çekirdek harcı) ve D9 (derz harcı) numaralı örneklerin alındığı yerler



Şekil 2.6: D8 ve D9 numaralı örneklerin alındığı yerler (2007).



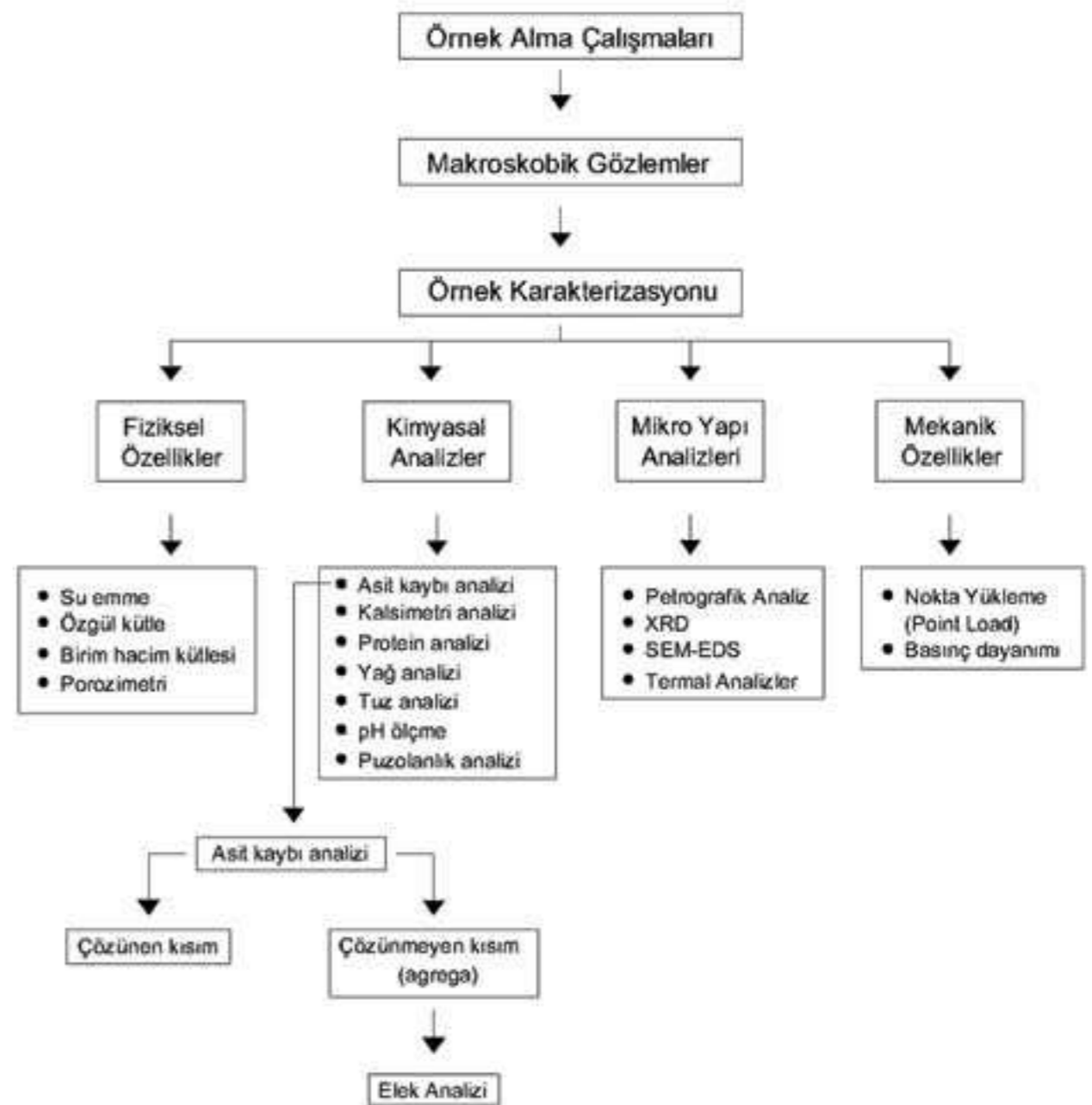
Şekil 2.7: Plan ve kesit çiziminde D1 (derz harcı) ve D2 (çekirdek harcı) numaralı örneklerin alındığı yerler (Plan ve kesit, Müller-Wiener 2007: 274).



Şekil 2.8: D1 ve D2 numaralı harç örneklerinin alındığı yerler (2007).

3. ÖZGÜN HARÇ VE SIVALARIN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tarihi yapılarda kullanılmış olan harçlarının özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan deneysel yöntemler Şekil 3.1'deki diyagramda gösterilmiştir. Buna göre örneklerin ilk olarak makroskobik gözlemleri yapılarak fotoğraflarla belgelenmiştir, ardından deneysel çalışmalara başlanılmıştır.



Şekil 3: Harçlar üzerinde uygulanan deney yöntemleri şeması

3.1. Makroskobik Gözlem Sonuçları

Örnek A7-Aspar Su Sarnıcı çekirdek harcı: Açık pembe renkli olan harç örneğinde, ortalama 4 mm. ve 2 mm. boyutlu tuğla agregalar ve deniz kabukları görülmektedir. Ayrıca 1 mm. boyutlu silisli agrega miktarı fazla olan sağlam yapılı bir harçtır (Şekil 3.1a).

Örnek A8-Aspar Su Sarnıcı derz harcı: Pembe renkli, yaklaşık 4 mm. ve 2 mm. boyutlu tuğla agregası fazla olan harç örneğinde mika taneleri ile kireç yığınları görülmekle birlikte oldukça sağlam yapılıdır (Şekil 3.1b).

Örnek D8-Hagios Mokios Sarnıcı çekirdek harcı: Açık krem renkli, iri tuğla kırığı ve çakıl agregası fazla olan, az miktarda tuğla tozu içeren, kireç yığınları çok yoğun olan sağlam yapılı bir harçtır (Şekil 3.2a).

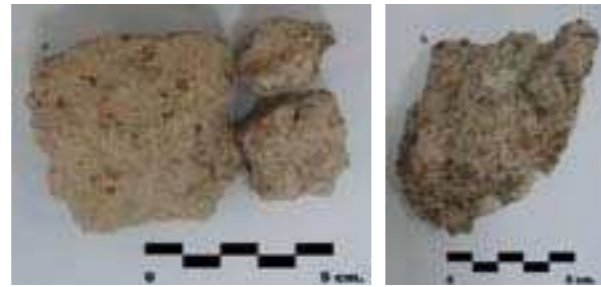
Örnek D9-Hagios Mokios Sarnıcı derz harcı: Açık pembe renkli, sarıya yakın renkte büyük kireç yığınları olan, yer yer 8 ve 4 mm. boyutlu çakıl taneleri görülen sağlam yapılı bir harçtır (Şekil 3.2b).

Örnek B9-Aetios Sarnıcı çekirdek harcı: Pembe renkli ve sağlam yapılı olan harcın bağlayıcı kısmında sarıya yakın renkler görülmektedir. Bu renkler, parlak sarı mika tanelerinden ve ortalama 4-2 mm. boyutunda, kırmızı renkli tuğla agregası ile birlikte 2 -1 mm. boyutundaki sarı renkli tuğla agregalardan ileri gelmektedir (Şekil 3.3a).

Örnek B10-Aetios Sarnıcı derz harcı: Beyaz renkli olan kireç harcında iri tuğla kırığı agregalar bulunmaktadır. Bağlayıcı kısmında parlak tanecikler de görülen harç yumuşak yapılıdır (Şekil 3.3b).

Örnek D1-Valens Su Kemerine derz harcı: Tuğla tozunun azlığından dolayı pembe renkli olan harç örneğinde, yoğun olarak yaklaşık 4 mm. boyutunda tuğla ve çakıl agregası bulunmaktadır. Bununla birlikte iri tuğla agregası da olan harç örneğinde dere kumundan ileri gelen mika taneleri görülmektedir. Bağlayıcısında kireç topakları da gözlemlenen harç genel olarak sağlam yapılıdır (Şekil 3.3c).

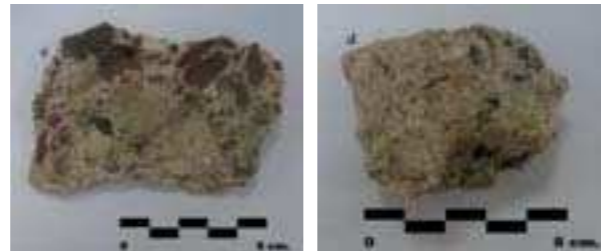
Örnek D2-Valens Su Kemerine çekirdek harcı: Açık pembe renkli olan harç örneğinde, iri tuğla kırığı agrega ile çakıl agregası görülmektedir. Açık pembe renkli olan harcın bağlayıcı kısmında kömür izleri gözlemlenmektedir. Bu kömür taneleri kirecin kızdırılması sırasında karışmış olabilir (Şekil 3.3d).



Şekil 3.1: a) A7, b) A8 no.lu örnek fotoğrafları.



Şekil 3.2: a) D8, b) D9 no.lu örnek fotoğrafları



Şekil 3.3: a) B9, b) B10, c) D1, d) D2 no.lu örnek fotoğrafları

Tablo 3.1: Harç örneklerinin fiziksel özellikleri

Örnek Numarası ve Adı	Sk (%)	Sh (%)	Δ (gr/cm ³)	δ (gr/cm ³)	p(%)
A7- Aspar Su Sarnıcı çekirdek harcı	34	46	1,35	2,50	46
A8- Aspar Su Sarnıcı derz harcı	33	47	1,42	2,72	48
B9- Aetios Sarnıcı çekirdek harcı	28	39	1,40	2,64	34
B10- Aetios Sarnıcı derz harcı	22	32	1,43	2,63	33
D8-Hagios Mokios Sarnıcı çekirdek harcı	26	40	1,52	2,55	41
D9- Hagios Mokios Sarnıcı derz harcı	28	40	1,42	2,62	45
D1- Valens Su Kemerine derz harcı	32	44	1,40	2,60	45
D2- Valens Su Kemerine çekirdek harcı	33	45	1,39	2,58	46

Sk: Kütlece su emme oranı (%) Sh: Hacimce su emme oranı (%)

Δ : Birim hacim kütlesi (g/cm³) δ : Özgül kütle (g/cm³) p: Porozite (%)

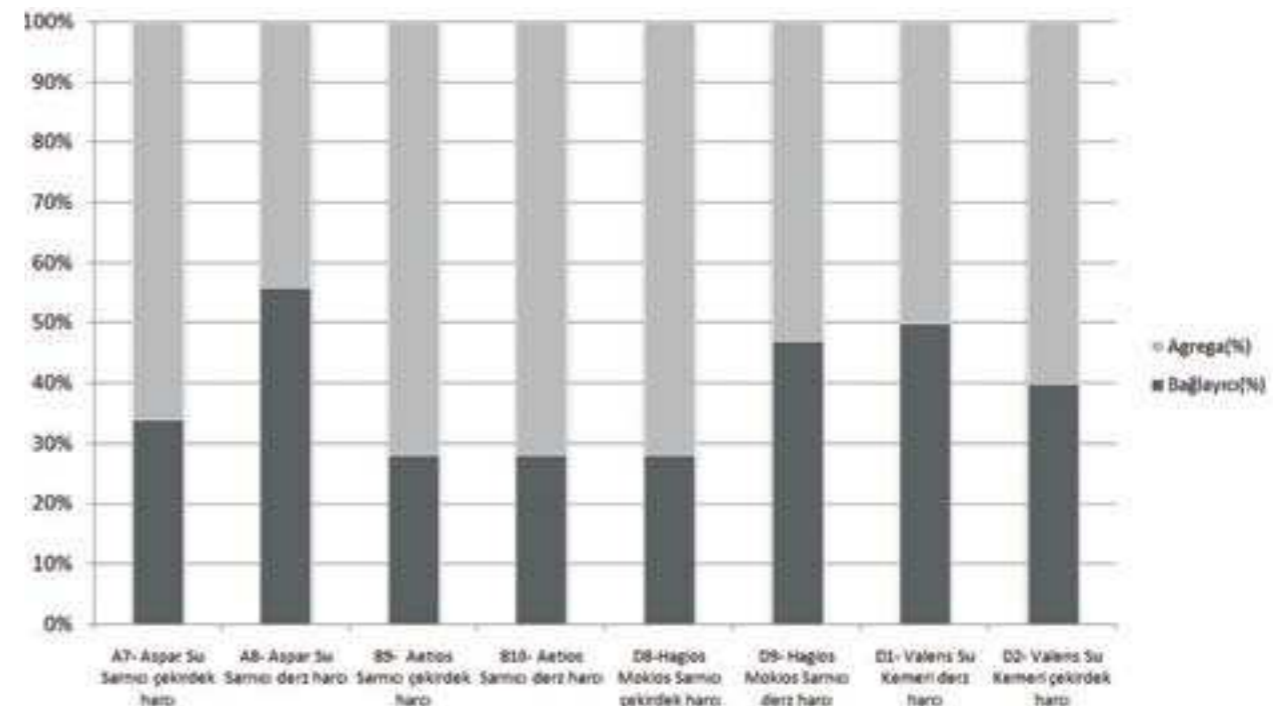
3.2. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Harç ve sıva örneklerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılan su emme deneyi TS 699'daki esaslara uygun olarak, distile suda örneklerin 48 saat süreyle bekletilip kurutulmasıyla ve ağırlık değişimlerinin izlenmesi ile yapılmıştır. Özgül kütle deneyi ise toz haline getirilmiş örneğin 125 μ m. altı incelikteki kısmı kullanılarak, bir kavanoz içindeki suya eklenmesi ile taşan suyun hacminin tespit edilmesi ve örneğin ağırlığının oranlanmasıyla belirlenmiştir. Bu deneylere bağlı olarak kütlece ve hacimce su emme yüzdeleri, birim hacim kütlesi, özgül kütle ve porozite değerleri hesaplanmış, sonuçlar Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Birim hacim kütlesi 1,35-1,52 gr/cm³ arasında değişen örneklerden D9 numaralı örneğin birim hacim kütlesi 1,77 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. Harç örneklerinin Porozite değerleri %30-%46 oranında tespit edilmiş olup; boşluklu yapıda kireç harçları olduğu söylenebilir.

Tablo 3.2: Asit kaybı deneyi sonuçları.

Örnek Numarası ve Adı	İlk Kütle Kuru (g)	Kalan İnce Malz. (g)	Kalan Kaba Agregası (g)	Kalan Toplam Malz. (g)	Asitte Kayıp (%)	Bağlayıcı / Agregası Oranı
A7- Aspar Su Sarnıcı çekirdek harcı	24,30	1,11	14,92	16,03	34	1/2
A8- Aspar Su Sarnıcı derz harcı	7,84	0,71	2,74	3,45	56	1/1
B9- Aetios Sarnıcı çekirdek harcı	29,8	1,25	20,09	21,34	28	1/4
B10- Aetios Sarnıcı derz harcı	46,69	2,79	30,48	33,27	28	1/4
D8-Hagios Mokios Sarnıcı çekirdek h.	73,01	1,06	51,28	52,34	28	1/4
D9- Hagios Mokios Sarnıcı derz harcı	47,39	1,88	23,39	25,17	47	1/1
D1- Valens Su Kemerine derz harcı	43,97	1,68	20,32	22	50	1/1
D2- Valens Su Kemerine çekirdek harcı	59,19	4,25	31,07	35,32	40	1/2



Şekil 3.4: Yapıların bağlayıcı/ agrega dağılım yüzdeleri.

Tablo 3.3: Kızdırma kaybı analiz sonuçları

Örnek Numarası ve Adı	105°C'deki Kayıp (%)	550°C'deki Kayıp (%)	1050°C'deki Kayıp (%)	Karbonat Miktarı (%)	Hidrolik Özellik Değeri
A7- Aspar Su Sarnıcı çekirdek harcı	1,62	1,65	16,83	38,25	10
A8- Aspar Su Sarnıcı derz harcı	5,02	7,91	22,73	51,65	2,9
B9- Aetios Sarnıcı çekirdek harcı	0,82	3,55	10,25	23,30	2,8
B10- Aetios Sarnıcı derz harcı	7,46	4,24	11,40	26,10	2,7
D8-Hagios Mokios Sarnıcı çekirdek h.	0,75	5,47	12,80	27,10	2,3
D9- Hagios Mokios Sarnıcı derz harcı	1,11	4,75	19,96	45,37	4,2
D1 - Valens Su Kemerine derz harcı	5,22	6,96	21,03	47,76	3,0
D2 - Valens Su Kemerine çekirdek harcı	1,47	3,03	18,75	42,62	6,2

Yapılardan alınmış olan harç örneklerinde yapılmış olan asit kaybı analizinde bağlayıcı kısmının agrega kısmına oranı 1/1, 1/2, 1/3 ve 1/4 olarak belirlenmiştir. Bu oranlar Roma ve Bizans dönemi harçlarında sıklıkla görülmektedir. Analiz sonucunda, incelenen tüm örneklerin kireç bağlayıcılığı olduğu görülmüştür. Örneklerin bağlayıcı ve agrega ara yüzeyinde kuvvetli bağla oluşmuş olup, analiz sırasında bazı örneklerde bağlayıcının agrega üzerinden ayrışmadığı gözlemlenmiştir. Deneyin doğruluğunu sağlayabilmek amacıyla deney aşamaları tekrarlanmış ve kireç bağlayıcının tümünün çözünmesi sağlanmıştır. Şekil 3.4'de harçların bağlayıcı kısımlarının %20 ile %50 oranında değişmekte olduğu görülmektedir.

Kızdırma Kaybı ve Puzolanik Aktivite Analizi:

Yapılardan alınan harç numunelerinin bağlayıcı kompozisyonları, harçların nem ve karbonat miktarları, hidrolik özellikleri Tablo 3.3'teki kızdırma kaybı değerleriyle birlikte verilmiştir. 63 µm. elekten elenen bağlayıcı yönünden zengin örnekler CONRAD NABER marka kül fırınında 105 °C'de 2 saat, 550 °C'de 1 saat ve 1050 °C'de 1/2 saat kızdırılmış ardından her işlem sonunda desikatörde örnekler soğutulup hassas terazi (Metler H20) ile ağırlık değişimleri tespit edilmiştir.

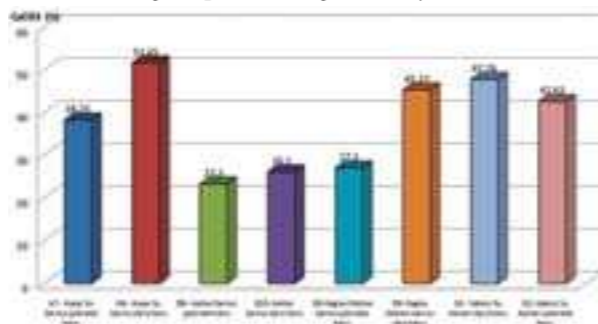
Horasan harçlarında 200–600 °C arasında kireç ve tuğla ara yüzeylerinde bulunan hidrolik ürünlerin dekompozisyonunda kimyasal su kaybına ve 600–900 °C arasında ise karbonatlaşmış kirecin kalsinasyonu ile karbondioksit (CO₂) kaybına bağlı olarak ağırlık azalmaları meydana gelmektedir. Bu sonuçtan hareketle CO₂ / kimyasal su oranı 1–10 oranındaysa harç hidrolik, 10'dan fazla ise hidrolik olmadığı sonucuna varılabilir (Moropoulou ve diğ. 1999: 51; Çizer ve diğ. 2004: 477; Silva ve diğ. 2005: 39; Genestar ve diğ. 2006: 377; Uğurlu ve Böke 2006: 594). Bu bilgiler ışığında, kızdırma kaybı analizinden elde edilen değerlere göre harçların CO₂ / H₂O oranları 1,5 ila 10 arasında belirlenmiştir (Tablo 3.3) ve bu harçların hidrolik özellik taşıdıkları söylenebilir. Şekil 3.5'de harçların CaCO₃ miktarları yüzde olarak verilmiştir. Bu de-

Tablo 3.4: Tuğla agregaların puzolanik aktivite deney sonuçları.

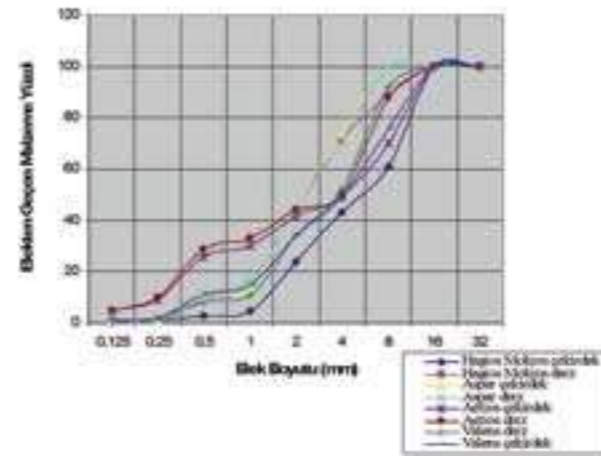
Örnek Numarası ve Adı	Puzolanik Aktivite mS/cm
A7- Aspar Su Sarnıcı çekirdek harcı	1,18
A8- Aspar Su Sarnıcı derz harcı	0,53
B9- Aetios Sarnıcı çekirdek harcı	2,13
B10- Aetios Sarnıcı derz harcı	1,57
D8-Hagios Mokios Sarnıcı çekirdek harcı	0,78
D9- Hagios Mokios Sarnıcı derz harcı	2,75
A5 - Valens Su Kemerine derz harcı	0,80
A6 - Valens Su Kemerine çekirdek harcı	0,63

ğerler ile Şekil 3.4'deki değerlerin benzer olduğu görülmekte ve deney sonuçları birbirini doğrulamaktadır.

Puzolanik aktivite deneyinde, öncelikle doygun Ca(OH)₂ çözeltisi hazırlanır ve çözeltinin tuğla agrega ile karışmadan önceki elektrik iletkenliği ölçülür. Asit kaybı deneyi ile ayrışan tuğla agregalarda yapılan elek analizi sonrasında 125 µm. eleği altında kalan agrega kısmı 1 g/50 ml. oranında olacak şekilde çözeltiyle karıştırılır ve çözeltinin karışımından sonraki elektrik iletkenlik değeri tekrar ölçülür. İletkenlikler arasındaki farkın gözlemlenmesi ile harcın puzolanik özelliği tespit edilir. Eğer reaksiyondan sonra ilet-



Şekil 3.5: Harçların yüzde CaCO₃ miktarları.



Şekil 3.6: Su yapıları derz ve çekirdek harcı örnekleri agrega granülometri eğrisi

kenlikler arasındaki fark 1.2 mS/cm'den büyük ise harç iyi puzolan, 0,4-1,2 mS/cm arasında ise puzolan, <0,4 mS/cm ise puzolanik değildir denilebilir (Çizer ve diğ. 2004: 471; Budak ve diğ. 2004: 509,510; Uğurlu ve Böke 2006: 591; Palomo ve diğ.: 7,8).

İncelenen yapılardan alınan örneklerde bu esaslara göre gerçekleştirilen deneyde tuğla agregaların puzolan özelliği taşıdığı; özellikle A7, B9, B10 VE D9 numaralı örneklerin yüksek puzolanik aktiviteye sahip oldukları belirlenmiştir.

Elek Analizi:

Harçların agrega granülometrisi ve agrega tipini belirlemek için, asit kaybı analizi sonrasında örneklerin asitte çözünmeden kalan kısımlarında elek analizi yapılmıştır. Örnekler 16 mm. ile 125 µm.'lik ISO 565 serisi elekler kullanılarak, eleklerden geçen malzeme yüzdeleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 3.6'daki diyagram ile ifade edilmiştir.

Elek analizi sonuçlarının yer aldığı Şekil 3.6'da, harçlarda yoğun olarak 2-4 mm. boyutunda tuğla agregalar

bulunduğu, bununla birlikte 8-16 mm. boyutlu iri tuğla kırıklarına da rastlanıldığı görülmektedir. Tuğla agregalar köşeli olmakla birlikte, Hagios Mokios Sarnıcı ve Valens Su Kemerinden alınmış olan örneklerde 4 mm. boyutunda çakıl agregalar da tespit edilmiştir. Bu harçlarda dere kumundan ileri gelen mika taneleri de mevcuttur. A7 numaralı örnekte de agrega kısmında deniz kabukları görülmüştür. Aetios Sarnıcı'ndan alınan örneklerde de mika ve parlak tanecikler elek analizi sonrasında belgelenmiştir. Bu sonuçlardan hareketle harçların yapımında dere kumunun kullanılmış olduğu, çakıl agregalarının da kumla birlikte harcın içerisine dahil olduğunu söyleyebiliriz.

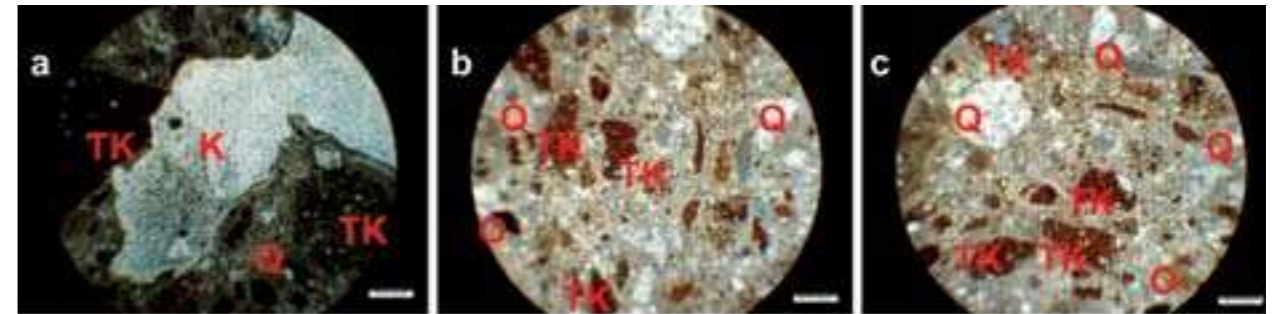
3.4. Mikro Yapı Analizleri

Petrografik Analiz

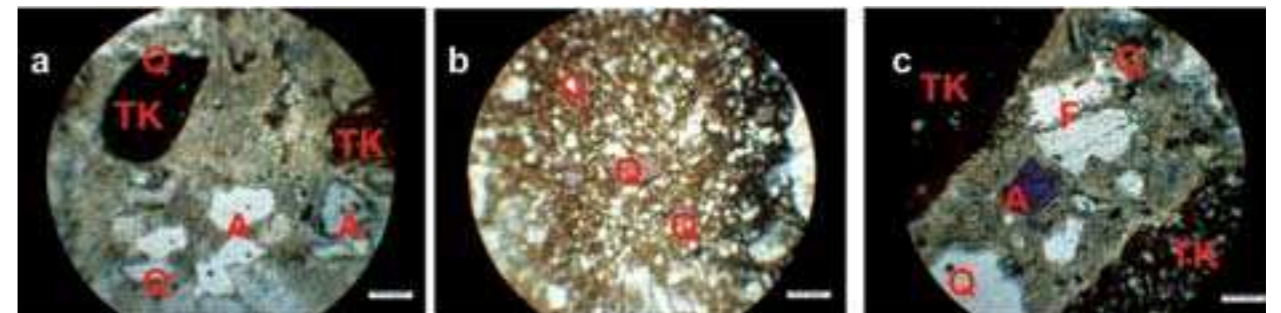
Örnekler öncelikle kesilip lam'a yapıştırıldıktan sonra taş kesme ince kesit makinesi (Logitech) ile önce 1 mm. kadar daha sonra, 30 µm.e kadar inceltilmiştir. Örneklerden elde edilen ince kesit fotoğrafları, çift nikol olarak SOIF marka polarize mikroskopta 4X büyütmede çekilmiştir.

Aspar Su Sarnıcı'nın derz harcı örneğinin petrografik analizinde karbonatlaşmış bağlayıcı matrisi görülmektedir (Şekil 3.7a). Harcın makroskobik yapısında da kireç yığınları dikkat çekmiştir. Kırmızı ve bordo renkte tuğla kırığı agrega içeren harcın bağlayıcı ara yüzeyinde kırmızı renkte tuğla tozu ve pembe renkli doku gözlemlenmektedir (Şekil 3.7b). Şekil 3.7c'deki görüntüde tuğla agreganın yanında çekmektedir. Özellikle görüntünün sağ tarafında gri, siyah ve krem renkli agregalar bulunmaktadır.

D8-Hagios Mokios Sarnıcı derz harcı örneğinin ince kesit analizlerinde bağlayıcı matrisinin griye yakın renkte olduğu görülmektedir. Harcın bağlayıcı ve agrega doku-



Şekil 3.7: A8 Aspar Su Sarnıcı derz harcı, a) Tuğla kırığı çevresindeki karbonatlaşmış matrisin görüntüsü, b) Genel doku görüntüsü, c) Bağlayıcı matrisinin görüntüsü (TK: Tuğla kırığı, Q: Kuvars, O: Opak taş kırığı, K: Karbonatlaşmış matris)



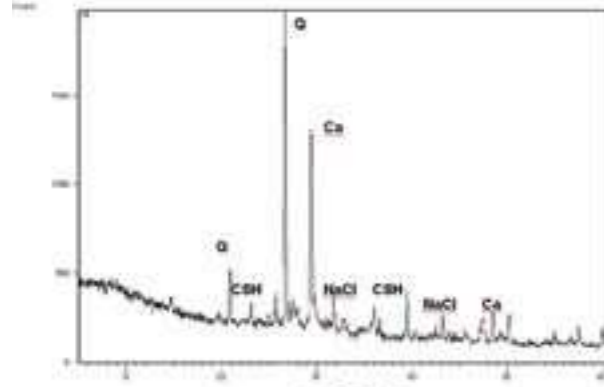
Şekil 3.8: D8 Hagios Mokios Sarnıcı derz harcı, a) Genel doku görüntüsü, b) Tuğla agreganın görüntüsü, c) Bağlayıcı matrisindeki karbonatlaşmanın görüntüsü (TK: Tuğla kırığı, Q: Kuvars, F: Feldispat, A: Farklı renkteki agrega)

sunun bir arada görüldüğü Şekil 3.8'de yuvarlak ve köşeli tuğla kırığı agregalar ile birlikte siyah ve gri renkte taş kırığı agregalar da bulunmaktadır. Şekil 3.8b'de tuğla agreganın boşluklu iç yapısı ve kuvars mineralleri görülmektedir. Bağlayıcı ve agregası ara yüzeyinin Şekil 3.8c'deki görüntüsünde koyu renkli tuğla kırığı agregası, koyu gri renkli taş kırığı agregası, kuvars mineralleri ve feldspat bulunmaktadır. Kuvars ve feldspat minerali tuğla kırığı ve tuğla tozundan ileri gelmektedir.

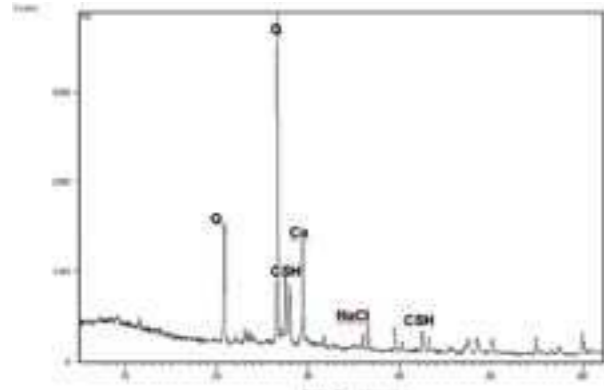
X-ışını Analizi

Toz haline getirilen örnekler PW 3050/60 X'Pert PRO X-ray kırılma cihazıyla CuKα ışını ve 40 kV voltaj ile yapılmıştır.

A8 numaralı örneğin X-ışını grafiğinde yüksek pikte kuvars ve kalsit, düşük piklerde de yine kalsit ve kuvars ayrıca iki ışınım pikinde sodyum klorür minerali ile kalsiyum silikat hidratlı bileşikler görülmüştür (Şekil 3.9). Kalsit, harcin bağlayıcısı olan kirecin karbonatlaşmasından, kuvars ise tuğla kırığı agregadan ileri gelmektedir. NaCl tuzu harcin doğal yapısındaki bir mineral olmamakla birlikte dış etkenlerden ileri gelmektedir. İklimsel koşullar veya bir dönem sarnıç olarak kullanılmış olan yapının su ile ilişkisinden de kaynaklanma ihtimali vardır. Ayrıca CSH (kalsiyum silikat hidrat) ürünlerinin varlığı kireç bağlayıcının, puzolanik özellikli tuğla agregası ile reaksiyona girmesi ile oluşmakta-



Şekil 3.9: A8 no.lu Aspar Su Sarnıcı derz harcı numunesinin X-ışını Grafiği (Ca: Kalsit, Q: Kuvars, CSH: Kalsiyum Silikat Hidrat, NaCl: Sodyum Klorür)



Şekil 3.10: D8 no.lu Hagios Mokios Sarnıcı derz harcı numunesinin X-ışını Grafiği (Ca: Kalsit, Q: Kuvars, CSH: Kalsiyum Silikat Hidrat, NaCl: Sodyum Klorür)

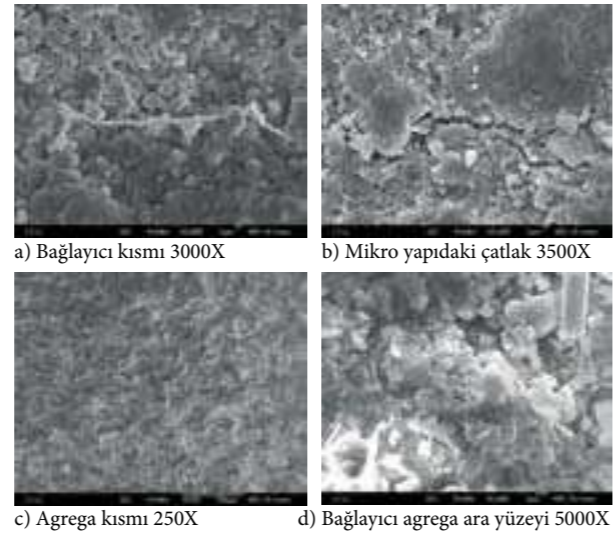
dır. Bu bileşikler harcin hidrolik özellik taşıdığını da göstermektedir (Özkaya ve diğ., 2006, s.625).

Şekil 3.10'da D8 numaralı Hagios Mokios Sarnıcı'nın derz harcı örneğinde de benzer durum gözlemlenmektedir. XRD grafiğindeki en yüksek pik değerlerine sahip kalsit ve kuvars mineralleri harcanın genel yapısını oluşturan tuğla agregası ve kireç bağlayıcıdan ileri gelmektedir. Bu harcin yapısında, X-ışını analizinde görülen kalsiyum silikat hidratlı bileşikler A8 numaralı örnekte de olduğu gibi agregası ve bağlayıcının sağlam bağ oluşturarak hidrolik özellik taşıdığını göstermektedir.

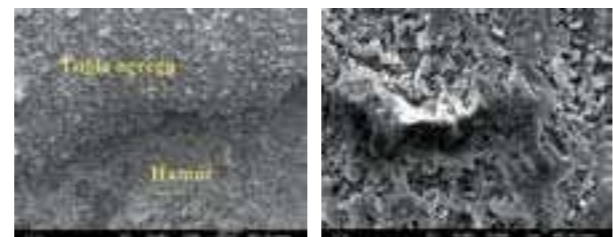
SEM-EDS Analizi

Harçların kimyasal kompozisyonları JEOL JSM-7000 F marka Scanning Elektron Microscope (SEM) cihazı ile incelenmiştir.

A8 numaralı Aspar Su Sarnıcı derz harcı örneğinin Şekil 3.11'deki bağlayıcı kısmından alınmış SEM görüntüsünde kalsit kristallerinin arasında bağ şeklinde uzanmış bir form görülmektedir. Bu bağ oluşumu harcin iç yapısındaki reaksiyonlardan ileri gelmektedir. Şekil 3.11b'de mikro yapıda oluşmuş çatlak ve kristal haldeki kalsit ile karbonatlaşmış bir kısım da görülmektedir, bu karbonatlaşma örneğin petrografik analizinde de görülmüştür. Örneğin Şekil 3.11c'deki SEM görüntüsünde tuğla agregalarının homojen bir yapıya sahip olduğu tespit edilmektedir. Şekil 3.11d'deki SEM görüntüsünde bağlayıcı kısmında yer alan kalsit kristalleriyle birlikte görülen agreganın etrafındaki yoğunlaşma ve jelse

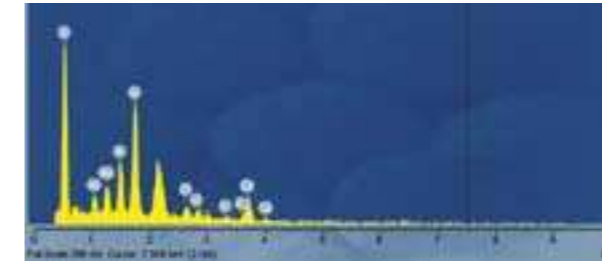


Şekil 3.11: A8 no.lu Aspar Su Sarnıcı derz harcı numunesinin SEM görüntüleri.

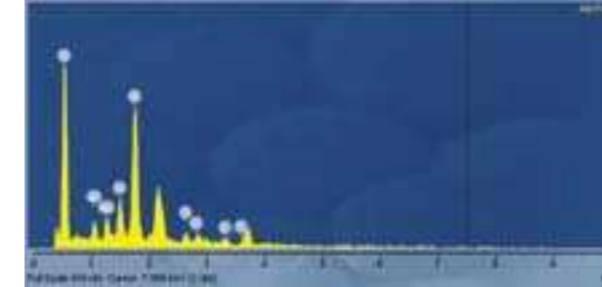


Şekil 3.12: A8 no.lu Aspar Su Sarnıcı derz harcı numunesinin SEM görüntüleri (100X ve 3000X)

formlar silikatlaşmadan ileri gelmektedir. Şekil 3.12'de de agregası ve bağlayıcının genel dokusu ile bağlayıcı içerisindeki kireç kristalleri görülmektedir.



Şekil 3.13: A8 no.lu numunenin bağlayıcı kısmı EDS Diyagramı (3500x).



Şekil 3.14: A8 no.lu numunenin agregası kısmı EDS Diyagramı (250x)



Şekil 3.15: A8 no.lu numunenin bağlayıcı agregası ara yüzeyi EDS Diyagramı (5000x)

Tablo 3.5: A8 no.lu Aspar Su Sarnıcı derz harcı örneğinin agregası, hamur ve bağlayıcı agregası ara yüzeyinden alınan EDS sonuçları.

Element	Hamur kısmı EDS Sonuçları		Agregası kısmı EDS Sonuçları		Bağlayıcı Agregası ara yüzeyi EDS Sonuçları	
	Atom (%)	Konsantrasyon (wt,%)	Atom (%)	Konsantrasyon (wt,%)	Atom (%)	Konsantrasyon (wt,%)
O	60,58	45,15	65,44	51,75	69,34	55,05
Na	2,81	3,06	2,75	3,13	2,14	2,42
Mg	0,43	0,94	2,88	3,47	0,89	1,07
Al	3,12	4,82	4,51	6,01	1,58	2,09
Si	10,26	14,96	20,42	28,35	17,94	27,35
K	0,57	1,05	1,58	3,06	0,62	1,20
Ca	19,80	25,90	-	-	7,48	10,84
Cl	2,46	4,12	2,42	4,24	-	-
Toplam	100	100	100	100	100	100

Tablo 3.6: Bazı örnekler üzerinde yapılan basınç dayanımı analiz sonuçları

Örnek Numarası ve Adı	Nokta Yüklemedeki Basınç Dayanımı (MPa)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)
A7- Aspar Su Sarnıcı çekirdek harcı	0,4	4
B9- Aetios Sarnıcı çekirdek harcı	0,5	5
D9- Hagios Mokios sarnıcı derz harcı	0,5	5

Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'da yer alan EDS diyagramlarından elde edilen sonuçlara göre harcin bağlayıcı matrisi, agregası ve bağlayıcı-agregası ara yüzeyindeki element dağılımı Tablo 3.5'de ifade edilmiştir. Harcin bağlayıcı kısmında yüksek oranda oksijen, kalsit ve silisyum, düşük oranda sodyum, klorür, alüminyum, magnezyum ve kuvars gözlemlenmiştir. Kalsit ve oksijen kireci oluşturan elementler olmakla birlikte; silisyum, alüminyum ve magnezyum tuğla agregasından ileri gelmektedir. Bu elementlerin bağlayıcı kısmında görülmesi harcin tuğla tozu ile oluşan yapısından kaynaklanmaktadır. Harcin agregası kısmı üzerinde yapılmış EDS analizi sonuçlarındaki değerlerde (Şekil 3.14 ve Şekil 3.5) yüksek oranda (%51,75) oksijen ve silisyum (%28,35) mevcuttur. Düşük oranda da magnezyum, alüminyum, kuvars, sodyum ve klorür elementleri de mevcuttur. Bağlayıcı ve agregası ara yüzeyindeki silisyum miktarının agregadaki oranından fazla olması dikkat çekmektedir. Bu durum hem bağlayıcı kısmındaki tuğla tozunun çokluğundan ve kullanılan tuğlaların farklılığından kaynaklanmaktadır.

3.4.1. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Kireç esaslı harçlar çok dağılgan malzemelerdir; yapılardan alınan harç örneklerinde basınç dayanımı testi yapabilmek için uygun boyutta örnek hazırlamak zor olmuştur. Boyutu büyük ve daha dayanıklı olan örnekler düzgün boyutta kesilerek tek eksenli basınç dayanımı testi yapılmıştır. Düzgün boyutlu olmayan örneklerde ise bu deney Nokta Yükleme (Point-Loading) metodu ile yapılmıştır. İki deneyden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak bir korelasyon değeri (10) bulunmuştur; buna göre sonuçlar Tablo 3.6'de verilmiştir.

Aspar ve Aetios Sarnıcı'ndan alınmış çekirdek harcı örnekleri ile Hagios Mokios Sarnıcı derz harcı örneklerinde yapılmış nokta yükleme analizlerinde 4-5 MPa basınç dayanımı tespit edilmiştir. Kireç esaslı olan bu harçların basınç dayanımlarının iyi sağlam yapıları görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Su yapılarından alınmış olan harç örnekleri üzerinde yapılan laboratuvar testlerinde bu harçların boşluklu yapıda kireç harçları oldukları görülmüştür. Bağlayıcı olan kireç ile 2 mm. ila 8 mm. boyutlu köşeli tuğla agregaların karışım oranları 1/1, 1/2, 1/3 ve 1/4'tür. Asit kaybı petrografik analizlerde harçlarda dere kumu kullanılmış olduğu tespit edilmiştir. Kumdan ileri gelen opak mineraller ile taş kırıkları da harçların yapısını oluşturmaktadır. Harç örnekleri üzerinde yapılan asit kaybı analizi ile bağlayıcı/ agreganın karışım oranları (Şekil 3.4); kızdırma kaybı analizi ile harcın karbonat miktarı (Şekil 3.5) tespit edilmiştir ve deney sonuçları birbirini doğrular niteliktedir. Kızdırma kaybı analizinde harçtaki kimyasal su kaybına bağlı olarak harçların CO₂/H₂O oranları belirlenmiştir. Bu sonuçlardan hareketle harçların hidrolik özellikte olduğu söylenebilmektedir. Su depolamak amacıyla inşa edilmiş olan bu yapılarda kullanılan harçlar hidrolik özelliklerinden dolayı suya karşı dayanıklıdır.

Harçlarda kullanılmış olan tuğla agregalar üzerinde yapılmış olan deneylerde alüminyum, magnezyum, kuvars mineralleri içerdikleri, silisli yapıda ve puzolanik özellikte oldukları belirlenmiştir. XRD analizlerinde tespit edilen kalsiyum silikat hidratlı bileşikler ile A8 numaralı örnek



Şekil 4: Aspar Su Sarnıcı derz harcının yapı taşıyla olan ilişkisi.

üzerinde yapılmış olan SEM analizindeki jelsi oluşumlar bağlayıcı-agrega ara yüzeyinde oluşan kimyasal reaksiyonun ürünleridir. Bu reaksiyonlar harca hidrolik özellik kazandırmaktadır. Örnek alma çalışmalarında harçların yapı taşı ile birlikte sağlam bir bağ oluşturmuş olduğu görülmüştür. A8 numaralı Aspar Su Sarnıcı Sarnıcı'ndan harç örneği alınırken yapı taşı ile birlikte yüzeyden kopmuştur. Laboratuvar ortamında da bu farklı iki malzemeyi birbirinden ayırmak zor olmuştur (Şekil 4.1). Puzolanik özelliği dışında adezyon kuvvetinin de yüksek olduğu görülmüştür.

A8 numaralı harç örneğinin XRD ve EDS analizlerinde NaCl tuzu, D8 numaralı örneğin de XRD analizinde NaCl tuzu görülmüştür. Bununla birlikte harçlar üzerinde yapılmış tuz analizinde NaCl tuzu ile birlikte SO₄ ve NO₃ tuzları da az miktarda tespit edilmiştir. Ayrıca harçlarda protein ve yağ tespit edilmemiş olup, pH oranları ortalama 7,83 değerinde bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- Altuğ 2013: K. Altuğ, *İstanbul'da Bizans Dönemi Sarnıçlarının Mimari Özellikleri Ve Kentin Tarihsel Topografyasındaki Dağılımı*, İTÜ, İstanbul, Yayınlanmamış Doktora Tezi.
- Anabolu 2001: M.U. Anabolu, İstanbul ve Anadolu'daki Roma İmparatorluk Dönemi Mimari Yapıtları, *Arkeoloji ve Sanat Yayınları*, İstanbul.
- Ashurst/Ashurst 1990: J. Ashurst and N. Ashurst, *Practical building conservation, English Heritage Handbook, Volume 2*, Gower Technical Press, England.
- Bakolas vd. 1998: A. Bakolas, Biscontin, G., Moropoulou, A. and Zendri, E., Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis, *Thermochimica Acta*, 321, s.151-160.
- Böke vd. 2004: H. Böke, S. Akkurt, B. İpekoğlu, Tarihi yapılarda kullanılan horasan harcı ve sıvaların özellikleri, *Yapı Dergisi*, 69, s. 90-95.
- Böke vd. 2007: H. Böke, S. Akkurt, B. İpekoğlu, E. Uğurlu, Onarım amaçlı horasan harç ve sıvaların hazırlanması, *Mimarlıkta Malzeme Dergisi*, 3, s.68-72.
- Budak 2004: M. Budak, S. Akkurt, H. Böke, Manisa'da bulunan bazı Selçuklu dönemi yapılarının harç ve tuğlalarının onarım amaçlı incelenmesi, *2.Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, İTÜ, İstanbul, s. 506-516.
- Candeias vd.: A.E. Candeias, P. Nogueira, J. Mirao, A.S. Silva, R. Veiga, M. G. Casal, I. Ribeiro, and A. I. Seruya, Characterization of ancient mortars: Present methodology and future perspectives, *Chairmen of the European Research Councils' Chemistry Committee*, Evora University, National Laboratory of Civil Engineering (LNEC), www.conservarcal.lnec.pt.
- Çizer vd. 2004: Ö. Çizer, H. Böke ve B. İpekoğlu, Bazı Osmanlı dönemi hamam yapılarının kubbe ve duvarlarında kullanılan kireç harçlarının özellikleri, *2.Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, İTÜ, İstanbul, s. 469-481.

- Eyice 2006: S. Eyice, *Tarih Boyunca İstanbul*, Etkileşim Yayınları, İstanbul.
- Genestar vd. 2006: C. Genestar, C. Pons, A. Más, 2006. Analytical characterisation of ancient mortars from the archaeological Roman city of Pollentia (Balearic Islands, Spain), *Analytica Chimica Acta* 557, s.373-379.
- Gürdal/Acun 2005: E. Gürdal ve S. Acun, Tarihi yapılarda kullanılmış horasan harçları ve Eyüp'teki eski eser yapıların restorasyon ve onarımları için harç önerisi, *10. Eyüp Sempozyumu*, Eyüp, İstanbul, s.98-105.
- Gürdal vd. 2007: E. Gürdal, S. A. Özgünler, G. Kahraman, Anemas Zindanlarında kullanılmış olan harçların incelenmesi ve onarım harcı önerileri hakkında çalışma raporu, *1.Uluslararası Karasurları Sempozyumu*, İstanbul
- Gyllius 1997: P. Gyllius, *İstanbul'un Tarihi Eserleri*, Eren Yayıncılık, İstanbul.
- Kılıç vd. 2004: D.O. Kılıç, H. Böke, S. Akkurt, ve B. İpekoğlu, Tarihi St. Jean Kilisesinde kullanılan horasan harçlarının özellikleri, *2.Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, İTÜ, İstanbul, s. 607-615.
- Kuban 2004: D.Kuban, *İstanbul Bir Kent Tarihi*, Türkiye Ekonomik ve Toplumsal Tarih Vakfı, İstanbul.
- Mango 1976: C. Mango, *Byzantine Architecture*, New York.
- Mango 2006: C. Mango, *Bizans Mimarisini*, Rekmay Ltd., İstanbul.
- Moropoulou vd. 2000: A. Moropoulou, A. Bakolas and K. Bisbikou, Investigation of the technology of historic mortars, *Journal of Cultural Heritage*, 1, s.45-58.
- Moropoulou vd. 2002: A. Moropoulou, A. Cakmak, G. Biscontin, A. Bakolas and E. Zendri, Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia, *Construction and Building Materials*, 16, s.543-552.
- Moropoulou vd. 2003: A. Moropoulou, K. Polikreti, A. Bakolas and P. Michailidis, Correlation of physicochemical and mechanical properties of historical mortars and classification by multivariate statistics, *Cement and Concrete Research*, 33, s.891-898.
- Moropoulou vd. 2004: A. Moropoulou, A. Cakmak, K.C. Labropoulos, R. Van Grieken and K. Torfs, Accelerated microstructural evolution of a calcium,silicate-hydrate (C-S-H) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: Comparison with historic pozzolanic mortars, *Cement and Concrete Research*, 34, s.1-6.
- Müller-Wiener 2004: W. Müller-Wiener, *İstanbul'un Tarihsel Topografyası*, Wasmuth Verlag, Tübingen, Yapı Kredi Yayınları, İstanbul.
- Özkaya 2006: A. Özkaya, H. Böke. ve B. İpekoğlu, Roma dönemi tuğla ve harçların özellikleri: Bergama Serapis Tapınağı örneği, *3.Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, İTÜ, İstanbul, s. 616-627.
- Palomo vd.: A. Palomo, M.T. Blanco-Varela, S. Martinez-Ramirez, F. Puertas and C. Fortes, Historic mortars: characterization and durability, new tendencies for research, www.arcchip.cz/w09/w09_palomo.pdf.
- Rilem 2005: Investigative methods for the characterisation of historic mortars, in *Materials and Structures* 38, Part 1 and Part 2, s.761-769, s.771-780.
- Silva vd. 2004: A.S. Silva, J. M. Ricardo, M. Salta, P. Adriano, J. Mirao, A.E. Candeias and S. Macias, Characterization of Roman mortars for the historical town of Mertola, *Eduardo Torroja Institute (CSIC)*, Madrid, Spain, www.conservarcal.lnec.pt.
- Silva vd. 2005: D.A. Silva, H. R. Wenk and P. J. M. Monteiro, Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern, *Thermochimica Acta*, 438, s.35-40.
- Strzygowsky/Forcheimer 1893: J. Strzygowsky/P. Forcheimer, *Byzantinischen Wasserbehälter von Konstantinopel*, Wien.
- Teutonico 1988: J. M. Teutonico, A Laboratory Manual for Architectural Conservators, ICCROM, Rome.
- TS-25 1975: Tras, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-699/T1 2000: Tabii yapı taşları, muayene ve deney metotları, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-4312 1985: Deney elekleri ve elek analizi- Terimler, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- Uğurlu/Böke 2006: E. Uğurlu/H. Böke, Osmanlı dönemi hamam yapılarında kullanılan horasan sıvalarının özellikleri, *3.Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, İTÜ, İstanbul, s. 585-596.
- Yerasimos 2011: S. Yerasimos, *Constantinople, Istanbul's Historical Heritage*, Germany.