

Sivrihisar Ulu Cami Yapı Malzeme Analizleri

Ali Akın AKYOL*

ÖZ

1275 yılında inşa edilmiş olan Sivrihisar Ulu Cami, Anadolu'da Selçuklu dönemi ahşap sütunlu cami tipinin en iyi korunmuş örneklerinden birini temsil etmektedir. Yapı, Osmanlı ve Cumhuriyet dönemlerindeki çeşitli onarım ve değişikliklerle bugüne ulaşabilmiştir. 2015 yılında, Sivrihisar Ulu Cami restorasyonu sürdürülürken camiye ait toprak/sediman, taş/kayaç, tuğla/kiremit, harç ve sıvalar yerinde incelenerek örnekleştirilmiş, takiben bilimsel bir araştırma projesi halinde incelenmiştir. Analizler, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Bölümü Malzeme Araştırma ve Koruma Laboratuvarı'nda (MAKLAB) gerçekleştirilmiştir. Sivrihisar Ulu Cami yapı malzemelerinin (cami ahşap malzemeleri hariç) arkeometrik yönden tanımlanması çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Arkeometrik incelemeler kapsamında örneklere fiziksel, kimyasal ve petrografik analizler uygulanmıştır.

Taş,tuğla ve kiremit örneklerin dayanımlarının belirlenmesi için temel fiziksel testler (birim hacim ağırlığı, su emme kapasitesi, gözeneklilik ve kayaç sertliği testleri) uygulanmıştır. Taş ve tuğla örnekler yüksek değerlerde toplam tuz içeriğe sahiptirler. Taş ve tuğla örneklerin yüksek miktarlarda karbonat, düşük miktarlarda fosfat, sülfat ve klorür türlerinde tuzlanmalar içerdiği belirlenmiştir. Petrografik analizler, yapıda yoğunlukla kireçtaşları ve yanında monzonit ve devşirme mermer türü taşların/kayaçların kullanıldığını göstermiştir. Yapısal taşlar fiziksel, petrografik ve kayaç kökenlerine göre değişen dayanım özelliklerine sahiptirler. Tuğla ve kireçtaşlarında bulunan yüksek orandaki tuzlanmanın kaynağını çevresel etkilerle toprak rezervuardan kapiler etki ile taşların bünyesine ve yüzeylerine taşınan çeşitli türde tuzlar oluşturmaktadır. Agregat/bağlayıcı kompozisyonu açısından değerlendirilen harç ve sıvalar oldukça farklı agregat/bağlayıcı içeriklere sahiptirler. Harç ve sıvaların agregat içeriğini yakın çevre akarsu yatağına ait iri ve yuvarlanmış yapıda, yerel kayaç formasyonunu yansıtan agregatlardır.

Anahtar Kelimeler: Sivrihisar Ulu Cami, Arkeometri, Restorasyon, Yapı Malzemeleri, XRF

Building Material Analyses of Sivrihisar Great Mosque

Ali Akin AKYOL*

ABSTRACT

Sivrihisar Great Mosque which was built in 1275, is one of the well preserved Seljuks Period wooden columned mosque in Anatolia. Mosque has repaired and partly renewed since Ottomans. During the restoration of the Sivrihisar Ulu Mosque in 2015, the soil/ sediment, stone/rock, brick/tile, mortar and plasters belonging to the mosque were examined in situ and studied in a scientific research project. Analyzes were carried out in the Materials Research and Conservation Laboratory (MAKLAB) of the Department of Cultural Properties Conservation and Restoration, Faculty of Fine Arts, Ankara Hacı bayram Veli University. This study aimed the characterizations of the building materials (except mosque wooden materials) archaeometrically. In the scope of archaeometric investigations, physical, chemical and petrographic analyzes were conducted on the samples.

Basic physical tests (unit volume weight, water absorption capacity, porosity and rock hardness tests) were applied to determine the strength of stone, brick and tile specimens. Stone and brick samples had a high total salt content. Stone and brick samples were found to contain high amounts of carbonate, low amounts of salts in phosphate, sulfate and chloride species. Petrographic analysis showed that the type of the structural rocks, limestones beside monzonite and reused marbles were used in the walls of buildings. Constructive stones have different properties depending their different locations with petrographic and physical features. The origin of the high soluble salt content of bricks and limestones were the soil reservoir where transferred to the surface of the stones by capillary reaction. Aggregate/binder composition evaluated with the mortars and plasters were quite different. Of mortars and plasters were coarse and rounded aggregate content of the nearby river bed and rounded structure, reflecting the local rock formations.

Key Words: Sivrihisar Great Mosque, Archaeometry, Restoration, Building Materials, XRF

1. GİRİŞ

Eskişehir'in en büyük ilçesi Sivrihisar (Ankara'ya 120 km, Eskişehir'e 90 km uzaklıkta) oldukça derin ve çeşitli kültür birikimi ile Anadolu'nun önemli ilçelerinden birisidir. Zaman içinde Hitit ve Frig uygarlıklarının yanı sıra Roma, Bizans ve Anadolu Selçuklu gibi önemli uygarlıklara da ev sahipliği yapan Sivrihisar'da, bu dönemlere ait kalıntılar bulunmaktadır.

Araştırma projesine konu olan Sivrihisar Ulu Cami ilçedeki en önemli eserlerden biridir. Şehir merkezindeki Ulu Cami 1275 yılında Mevlana'nın müritlerinden Eminiddin-i Mikail tarafından yaptırılmıştır. Anadolu'nun en büyük ahşap direkli camilerindendir. Çatısını 67 adet ağaç sütun taşımaktadır. (Web: Anadolu Selçuklu Envanteri).

Selçuklu mimari ve sanatındaki yeri, planlamadaki özgünlüğü ile döneminin diğer camilerine göre farklılıklar arz ettiğinden, caminin yapısal ve dekoratif malzeme karakteristiklerinin anlaşılması, belirlenmesi ve Anadolu mimarlık tarihi içindeki yerinin bu bağlamda belirlenmesi önemlidir.

Günümüzde yapının Cumhuriyet dönemi öncesinde geçirmiş olduğu iki onarım bilinse de yapı günümüze kadar detayları bilinmeyen çok daha fazla onarım geçirmiş durumdadır (Akyol, 2010).

Sivrihisar Ulu Cami, 2006 yılında Vakıflar Genel Müdürlüğü Eskişehir Bölge Müdürlüğü tarafından korumaya yönelik olarak başlatılan bir Rölöve, Restitüsyon, Restorasyon ve Çevre Düzenleme Projesi'nin konusunu oluşturacak şekilde ele alınmıştır (Akyol, 2010). Bu proje 2013 yılında bir restorasyon projesi halinde uygulaması yapılmak üzere başlatılmış 2015 yılı sonunda da tamamlanmıştır. 2006 yılında genel itibarı ile ele alınan koruma ve onarım çalışmaları, 2013 yılında restorasyon çalışmalarının başlaması ile bambaşka bir boyut kazanmış, yapının mimari özellikleri gerçekleştirilen çalışmalarla daha önce öngörülmeleyen şekilde açığa çıkmaya başlamıştır. Bu kapsamda caminin açığa çıkan duvar örgüleri, eklentileri, onarım/özgün duvar örgü taş/tuğla, kiremit, harç ve sıva özellikleri arkeometrik yöntemler kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında ahşap malzemeler ele alınmamıştır.

2. YÖNTEM VE ANALİZLER

KONDAKTOMETRİK ANALİZLER: Yapıları oluşturan malzemelerin tuz içerikleri, yapıların fiziksel durumları hakkında belirteç sayılabilecek bilgiler sunarlar. Farklı yapı malzemelerinin içeriğinde doğal olarak bulunan veya suda çözünerek sonradan malzemelerin yüzeyine veya gözeneklerine kapiler etki sonucu su ile taşınan tuzlar, malzemenin hem kendi bünyesinde, hem de ilişkide buldukları diğer malzemelerin yapılarında gerçekleşebilecek kimyasal değişimler hakkında bilgi vermektedir. En genel anlamıyla malzemelerdeki tuz içerikleri; örneklerin buldukları ortamlardan, taş/kayaçlar için petrografik kayaç özelliklerinden veya malzemelerin sahip oldukları doğal ya da başkalaşan (bozulmaya uğrayan) fiziksel/kimyasal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Örneklerde toplam tuz ölçümü tayini için; 25 ml su içerisine alınan 5 gram örnek, 1 saat santrifüjlenip süzülükten sonra üzerine standart sodyum heksametafosfat eklenmiştir. Analiz için hazırlanan örneklerin toplam tuz içerikleri iletkenlik ölçer (Neukum Seri 3001 marka pH-sıcaklık-iletkenlik ölçer) ile kaydedilmiş, sonuçlar ilgili eşitlikler kullanılarak toplam tuz miktarlarına ağırlıkça yüzde olarak (%^w/w) ulaşılmıştır. Analizler, Gazi Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Bölümü Malzeme Araştırma ve Koruma Laboratuvarı'nda (MAKLAB) gerçekleştirilmiştir.

SUDA ÇÖZÜNEN TUZ TÜRLERİNİN BELİRLENMESİ: Alanda örneklemeler sırasında veya laboratuvarında analizleri öncesinde uygulanan pratik ön testlerdir. Malzemelerin doğal içeriğini oluşturan ya da dış etkilerle (yağmur, kar, gece-gündüz sıcaklık farkları, hava kirliliği, trafik vb.) sonradan kazandıkları özellikleri belirlemek amacı ile uygulanmaktadır. Belli hacimsel sınırlar arasında nicel değerler veren spot tuz testleri; sodyum, potasyum ve magnezyum tuzları olan sulfatlar, fosfatlar, nitrat ve nitritler, klor ve karbonat gruplarını belirlemek üzere uygulanmaktadır. Taş, tuğla ve kiremit örneklerde tuz (katyon/anyon) türünün belirlenmesi için spot tuz testleri uygulanmış, örneklerin pH dağılımları belirlenmiştir. Anyon analizlerinde; standart Merck sülfat (SO_4^{2-} ; 114789), Merck klorür (Cl^- ; kod: 110079), Merck fosfat (PO_4^{3-} ; kod: 114846) ve Merck toplam sertlik (CO_3^{2-} ; kod: 110025) test kitleri kullanılmıştır. Analizler, Gazi Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Bölümü Malzeme Araştırma ve Koruma Laboratuvarı'nda (MAKLAB) gerçekleştirilmiştir.

FİZİKSEL TESTLER: Fiziksel testler ile yapı malzemelerin özgün özelliklerinden ne derece uzaklaştıklarını tesbit etmek mümkün olabilmektedir. Taş, tuğla ve kiremit örneklerin dayanımlarının belirlenmesi için temel fiziksel testler (birim hacim ağırlığı, su emme kapasitesi ve gözeneklilik ve kayaç sertliği) uygulanmıştır. Örneklerin doğrudan alınan kuru ağırlıkları, arşimet (su içerisinde) ve doymuş ağırlıkları (saf su içerisinde 50 torr basınç altında gözeneklere ulaşması sağlanan sulu ağırlık) yardımıyla birim hacim ağırlıkları (doymuş-kuru BHA, g/cm^3), su emme kapasitesi (%SEK) ve gözeneklilik (%P) ile kayaç sertliği (SH) değerleri belirlenmiştir belirlenmiştir (ASTM, 1984; Başarır vd., 2004; RILEM, 1980; Ulusay vd., 2005). Analizler, Gazi Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Bölümü Malzeme Araştırma ve Koruma Laboratuvarı'nda (MAKLAB) gerçekleştirilmiştir.

HARÇ VE SIVA ÖRNEKLERDE AGREGA/BAĞLAYICI ANALİZLERİ: Agregat ve bağlayıcı oranlarının belirlenmesi için öncelikle kuru tartıma alınan örnekler daha sonra bağlayıcı (tüm karbonat içerik; CO_3^{2-}) içeriklerinden arındırılmak üzere seyreltik asitle (%5'lik HCl) muamele edilmektedir. Süzme, yıkama ve kurutma işlemleri ile çözünen tüm karbonat içeriğinden (bağlayıcısından) ayrılan ve agregat kısmı elde edilen harç ve siva örnekler, oda sıcaklığında kurutulduktan sonra tekrar tartıma alınarak ağırlıkça toplam bağlayıcı (çözünen) ve agregat (%^{w/w}) miktarlarına ulaşılmıştır.). Örneklerin karbonat içerikli olmayan agregalarına sistematik eleme işlemi (Agregatların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler, Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini - Eleme Metodu - TS 3530 EN 933-1/ Şubat 2007)) uygulanarak (63-1000 μm arasındaki eleklerle) agregat tanecik dağılımları (granülometrik analiz) belirlenmiştir. Analiz, Gazi Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Bölümü Malzeme Araştırma ve Koruma Laboratuvarı'nda (MAKLAB) gerçekleştirilmiştir.

İNCE KESİT OPTİK MİKROSKOP ANALİZİ: Yapısal örneklerin ince kesitleri hazırlanarak optik mikroskopta incelenmiştir. İnce kesitler; taş, tuğla ve kiremit örneklerde dıştan içe doğru tüm tabakaları gösterecek şekilde doğrudan, harç ve siva örneklerde ise uygun bir reçine ile sertleştirme yapılarak hazırlanmıştır. İncelemelerde LEICA Research Polarizan DMLP Model alt ve üstten aydınlatmalı optik mikroskop kullanılmıştır. Fotoğraflamalar mikroskoba bağlı Leica DFC280 dijital kamera ile (16X ve 25X büyütme ile paralel ve çapraz nikelde), değerlendirmeler de Leica Qwin Digital Imaging Programı kullanılarak yapılmıştır. Harç ve sıvalarda agregat yapısını oluşturan kayaç ve mineraller Point Counting Programı kullanılarak tanımlanmıştır. Petrografik incelemeler Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (YEBİM) gerçekleştirilmiştir.

X-IŞINI FLORESANS (PED-XRF) ANALİZİ: Örneklerin ana, iz ve eser element içerikleri X-Işını Floresans Analizi Yöntemi (Polarised Energy Dispersive-XRF) kullanılarak belirlenmiştir (atom numarası 11 olan sodyumdan (Na), 92 olan uranyuma (U) kadar). Analizde hassasiyet limiti, ağır elementlerde 0,5 ppm ve hafif elementlerde ise 10 ppm'e kadar ölçüm yapabilmesine imkan verilmektedir. Analiz, Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (YEBİM) gerçekleştirilmiştir. PED-XRF analizi için seçilen taş, tuğla, kiremit, harç ve sıva örnekler agat havanda toz haline getirildikten sonra 32 mm'lik diskler oluşturulmuş her bir disk XRF analizinde kullanılan bir kimyasal ile (wacks) karıştırılarak aletin örnek bölgesine yerleştirilmiş ve analizi yapılmıştır. Bu çalışmada, X-LAB 2000 model PED-XRF (Polarized Energy Dispersive-XRF) spektrometresi kullanılmıştır. Analizde USGS (Birleşik Devletler Jeolojik Araştırma) standartları ve referans olarak GEOL, GBW-7109, ve GBW-7309 kullanılmıştır. Analiz, Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (YEBİM) gerçekleştirilmiştir.

3.BULGULAR

Sivrihisar Ulu Cami'nin restorasyon çalışmaları sırasında, proje çalışmalarına yönelik örneklemelerde bulunulmuştur. Örnekler öncelikle görsel olarak değerlendirildikten sonra fotoğflanarak belgelenmiş ve kodlanmıştır (Tablo 1 ve Şekil 1).

TAŞ ÖRNEKLER

Sivrihisar Ulu Cami'de ana yapı malzemesini taşlar oluşturmaktadır. Yapısal özellikleri ile düşük yoğunluklu ve yüksek gözenekli yapı malzemeleri daha dayanımsız durumda olan malzemelerdir. Örneklenen taşlar yoğunlukla kireçtaşı ve yanında monzonit, mermer ve monzodiyoritir (Tablo 6a).

Fiziksel test uygulanan taş örneklerin; taş türünden bağımsız olarak doygun/kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 2,54-2,84 g/cm³ / 2,21-2,77 g/cm³ arasında, toplam su emme kapasiteleri %0,52-6,69 arasında ve toplam gözeneklilikleri de %1,32-15,63 arasında değişim göstermektedir (Tablo 2). Örneklerin Schmidt çekici kayaç sertlik değerleri de 25,4-30,8 arasında değişmektedir. Taşların tümü, elde edilen kayaç sertliği verilerine göre "az sert" (SH: 21-40) kategoride sınıflandırılmıştır. Taş örnek seti içinde monzonit (ESU-T8) ve monzodiyorit (ESU-T1) örnekler yüksek, mermer örnek ortalama (ESU-T5) ve kireçtaşı örnekler de (ESU-T3, ESU-T4 ve ESU-T7) düşük değerlerde dayanımlara sahiptirler.

Taş örneklerin suda çözünen toplam tuz miktarları, içerdikleri tuz (anyon) türleri ile pH değerleri spot tuz testleri ve kondaktometrik analizlerle belirlenmiştir. Taşların pH değerleri zayıf bazik ortam şartlarını yansıtır şekilde 7,38-8,21 arasında (ort. 7,92), toplam tuz içerikleri de %0,39-1,99 arasında (ort. %1,32) değişmektedir (Tablo 3). Taş örnekler genel olarak yüksek değerlerde (%1 civarında) tuz içeriğe sahiptirler. Bununla beraber düşük (ESU-T5 ve ESU-T7 gibi) ve çok yüksek (ESU-T1, ESU-T3 ve ESU-T4 gibi) tuz içeriğe sahiptirler (toprakta >%0,15 yüksek tuzlanmayı işaret etmektedir; Dursun, 2008).

Taş örnekler içerdikleri tuz türleri açısından değerlendirildiğinde; örneklerin yüksek miktarlarda karbonat (192 ve 400 mg/L), düşük miktarlarda fosfat (0,20 ve 0,40 mg/L), sülfat (20 mg/L) ve klorür (3 ve 6 mg/L) türlerinde tuzlanmalar belirlenmiştir (Tablo 4). Kaynağını, ayrışan derz harçları ve toprak rezervuardan alan, zayıf bazik ortamda bulunan taşların tuzlanması bünyesel niteliktedir. Bununla beraber taşa taşınan çevresel (liken ve kuş dışkılarını yansıtan fosfat gibi) ve yapısal (rekristalizasyonu yansıtan karbonat) tuzlar mevsimsel (yağışlı dönemler) etkilerle artan veya azalan oranda yıl içinde değişimler de gösterebilmektedir.

İnce kesit optik mikroskop analizi ile petrografik yönden incelenen taş örneklerden yapısal özellik taşıyan taşlar kireçtaşı, monzonit, monzodiyorit ve diyopsit mermer kayaç türlerinde-

dir (Tablo 6a). Kireçtaşları pelajik kireçtaşı kayaç özelliğindedir. Kireçtaşı örneklerin yapılarında fosil ve fosil kavrıklarının da yer aldığı da belirlenmiştir (Tablo 6a). Petrografik incelemeler, yapıtaşlarını oluşturan kireçtaşları ve monzonitlerin yakın çevre yerel kayaç formasyonunu yansıtan kayaç grubuna ait olduğunu göstermiştir.

Yapısal kireçtaşı (ESU-T3 ve ESU-T4), mermer (ESU-T2 ve ESU-T5) ve monzonit (ESU-T8) örneklerinin kimyasal bileşimlerine PED-XRF analizi ile ulaşılmıştır. Kireçtaşlarının kimyasal içeriğini (ana element >%1) azalan oranda CaO, LOI (toplam karbonat), SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃; mermer örneklerin CaO, LOI ve SiO₂; monzonit örneğinden de SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, LOI, K₂O, Na₂O, MgO oluşturmaktadır. Kireçtaşı ve mermer örnekler oldukça benzer kimyasal içerik sergilemektedirler. En genel anlamıyla benzer kimyasal yapıya sahip kireçtaşı ve mermer örneklerin kayaç kökenlerinin aynı olduğunu söylemek mümkündür.

TUĞLA VE KİREMİT ÖRNEKLER

Sivrihisar Ulu Cami'den örneklenen yapısal tuğla ve kiremit örnekler fiziksel, kimyasal ve petrografik yönlerden ele alınmıştır. Tuğla örneklerin fiziksel test verileri de değerlendirildiğinde; örneklerin doymun/kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 2,23-2,88 g/cm³ (ort. 2,56 g/cm³) / 1,48-1,97 g/cm³ (ort. 1,75 g/cm³) arasında, toplam su emme kapasiteleri %11,55-32,71 arasında (ort. %18,05) ve toplam gözeneklilikleri de %20,72-48,48 arasında (ort. %31,12) değişim göstermektedir (Tablo 2). Kiremit örneklerin fiziksel test verileri değerlendirildiğinde de örneklerin doymun/kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 2,27-2,85 g/cm³ (ort. 2,63 g/cm³) / 1,44-1,92 g/cm³ (ort. 1,71 g/cm³) arasında, toplam su emme kapasiteleri %13,34-25,29 arasında (ort. %20,51) ve toplam gözeneklilikleri de %24,77-41,37 arasında (ort. %34,49) değişim göstermektedir (Tablo 2). Oldukça farklı dağılım veren tuğla ve kiremit örneklerin kendi örnek setleri içinde homojen bir yapı sergilemedikleri görülmektedir. Tuğla ve kiremit örneklerden birim hacim ağırlığı 1,90 g/cm³ üzerinde olan örnekler (ESU-B1, ESU-B7, ESU-B10, ESU-B11, ESU-B29, ESU-B34 gibi) yüksek, 1,60 g/cm³'ün altında olan örnekler de (ESU-B5, ESU-B6, ESU-B14 ve ESU-B35 gibi) düşük dayanıma sahip örneklerdir (Tablo 2). Fiziksel özellikleri açısından kiremit ve tuğla örnekler genel anlamda değerlendirildiğinde sundukları fiziksel verileriyle düşük kalitede (1,80 g/cm³'ün altında kuru birim hacim ağırlıkları ve %30'un üzerinde gözeneklilikleri ile) üretime sahiptirler (Tablo 2). Malzeme açısından kiremit örnekler de tuğlalardan daha düşük dayanım verilerine sahiptir.

Tuğla ve kiremit örneklerin toplam tuz içeriğini; yüksek miktarlarda karbonat (112 ve 192 mg/L), düşük/ortalama miktarlarda fosfat (0,20, 0,40 ve 0,60 mg/L) ve klorür (3 ve 6 mg/L) ile az sayıda örnekte düşük miktarda sülfat (20 mg/L) türlerinde tuzlanmalar belirlenmiştir (Tablo 4). Tuğla örneklerin toplam tuz içerikleri %0,50-3,08 arasında (ort. %1,71), kiremit örneklerin ise %1,24-2,39 arasında (ort. %1,59) değişim göstermektedir (Tablo 3). Örneklerin pH'ı da 7,06-7,83 arasındaki (ort. 7,50) değerlerdedir (Tablo 4). Oldukça gözenekli yapıdaki örneklerin toplam tuz içerikleri değerlendirildiğinde, yapılarında oldukça yüksek oranlarda (<%1,50) tuzlanmalar belirlenmiştir. Tuğlalarda ESU-B20 ve ESU-B24, kiremitlerde de ESU-B8 ve ESU-B10 örnekleri zayıf bazik ortam şartları içinde oldukça yüksek oranlarda toplam tuz içerikleri ile dikkat çeken örneklerdir (Tablo 3). En genel anlamda pişmiş toprak grubu örnekler, nemli ortam şartlarında tuzlanmanın tahripkar etkisini taşlara göre daha yüksek oranda taşıyan yapısal malzemelerdir.

Tuğla ve kiremit örnekler petrografik yönden ince kesit optik mikroskop analizi ile incelenmiştir. Agregat ve matriks özelliklerine sınıflandırılan tuğla ve kiremit örneklerden tuğla örnekler 8, kiremit örnekler de 4 grup altında, toplamda 10 farklı grup altında yer almışlardır (Tablo 6b). Örneklerin gözenekliliği, karbonat içeriği ve kil yapısı göz önüne alınarak genel olarak 750-950°C arasında değişen pişirimler uygulanarak üretilmişlerdir (Tablo 6b). Örneklerin matriks boşluk

oranları %3-8 arasında ve birbirine yakın değerlerde değişim göstermektedir (Tablo 6b). Örneklerin toplam matriks agrega içerikleri de %15-70 arasında değişim göstermektedir. Tuğla Gr9 örneği en düşük, Tuğla Gr1, Tuğla G2 ve Tuğla Gr6 örnekleri de oldukça yüksek oranda matriks agrega içeriği ve çeşitliliğine sahiptirler (Tablo 6b). Örneklerin agrega içeriğini, heterojen dağılımlı, ince (<0,5 mm) ve ortalama boyutlu (0,5-1,0 mm) kırıklı/köşeli agregalar oluşturmaktadır. Örneklerin agrega içeriklerinde, toplam agreganın %1,5 ve %2'si oranlarında tuğla kırığı parçalarına da rastlanılmıştır (Şekil 6). Tuğla örneklerin çoğunluğunda (Tuğla Gr1, Tuğla Gr5, Tuğla Gr8 ve Tuğla Gr9) görülen bu katkı bilinçli olarak örneklerin hamuruna eklenmiş olmalıdır.

Pişmiş toprak örneklerde kilin yapısını oluşturan agregalar yörenin kayaç formasyonunu yansıtan bileşenleri de yapıya doğal olarak taşıyarak üretim merkezlerinin kökenleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Örneklerin petrografik yapıları dikkate alındığında, yoğunlukla yakın çevre (sedimanter ve volkanik kayaç kökenli) kayaç kaynağını kullanan üretim merkezinde/merkezlerinde üretilmiş olmalıdırlar.

Tuğla ve kiremit örneklerin kimyasal bileşimleri PED-XRF analizi ile belirlenmiştir. Örneklerin kimyasal içeriğini azalan oranda SiO₂ (tuğla ort. %48,02 ve kiremit ort. %55,82), Al₂O₃ (tuğla ort. %13,47 ve kiremit ort. %14,42), LOI (toplam karbonat tuğla ort. %16,851 ve kiremit ort. %7,71), CaO (tuğla ort. %8,98 ve kiremit ort. %9,02), Fe₂O₃ (tuğla ort. %5,84 ve kiremit ort. %6,27), K₂O (tuğla ort. %2,44 ve kiremit ort. %2,37) ve MgO (tuğla ort.%2,35 ve kiremit ort. %2,70) oluşturmaktadır. Örneklerin ana element içerikleri değerlendirildiğinde, örneklerin CaO (kireç) ve LOI (toplam karbonat) içerikleri, zaman içerisinde ayrışan derz harçlarından örneklerin yapısına taşınmış olmalıdır. Tuğla örnekler içinde ESU-B4 örneğinin yapısında bulunan yüksek SO₃ (alçı türü bağlayıcıdan taşınma) içerik de aynı şekilde açıklanabilir. Tuğla örneklerden ESU-B17 örneği daha yüksek Na₂O, ESU-B7 örneği daha yüksek U ve kiremit örneklerden ESU-B33 örneği de daha yüksek LOI içeriği ile kendi örnek setleri içinde dikkat çeken örneklerdendir. Bununla beraber tuğla ve kiremit örneklerin yapısında oldukça belirgin bir farklılık göze çarpmaktadır. Tuğla ve kiremit örnekler ana element (>%1) içerikleri ile hem kendi örnek setleri içinde, hem de birbirleri arasında oldukça belirgin farklılıklara sahiptir (Şekil 2a,2b). Buna karşın örneklerin eser element içeriklerinde belirgin bir farklılık görülmemektedir. Bu durum, yapıda farklı dönemlerde kullanılmış olan tuğla ve kiremit örneklerin hammadde kaynaklarının benzer, üretim özelliklerinin farklı olduğuna işaret etmektedir.

Tuğla ve kiremit örneklerin dayanım özellikleri PED-XRF analizi ile belirlenen kimyasal içerikleriyle birlikte değerlendirildiğinde; dayanımı yüksek örnekler için yapılarında %30'un üzerindeki oranda SiO₂ (tuğla ort. %48,02 ve kiremit ort. %55,82), %10'dan düşük oranda CaO (tuğla ort. %8,98 ve kiremit ort. %9,02) ve %8'in altındaki oranda Fe₂O₃ (tuğla ort. %5,84 ve kiremit ort. %6,27) içermelidir (Özışık, 2000). İncelenen tuğla ve kiremit örneklerin yüksek SiO₂ ile birbirine yakın ve düşük oranlarda Fe₂O₃ ve CaO içerikleri anılan oranlarla oldukça uyumludur. Buradan hareketle tuğla ve kiremit örneklerin dayanımlarının ortalama ve ortalamanın üzerinde kalitede bir üretimi yansıtır nitelikte olduğunu söylemek mümkündür.

Stronsiyum (Sr) jeokimyasal olarak Ca'ya benzer ve kireç içeren maddeler (denizkabağu, kireçtaşı gibi) içerisinde bulunur. Sr'un 400 ppm'den fazla olması seramiklerin yapımında kullanılan hammaddenin tümüyle denizel olduğuna işaret etmektedir. Bununla beraber kireçtaşı içeren karasal hammaddede ise Sr miktarı genellikle 150 ppm'den azdır. Ayrıca üretimde karasal hammaddenin kullanılması halinde Zirkonyumun (Zr) da 160 ppm'den fazla olması beklenmektedir (Freestone vd., 2003). Sivrihisar Ulu Cami'ye ait tuğla ve kiremit örneklerin Sr ve Zr içerikleri ortalama değerler üzerinden sırasıyla 549,2 ve 712 ppm Sr ile 246,1 ve 274,9 ppm Zr'dir. Örneklerin Sr ve Zr içerikleri dikkate alınarak tuğla ve kiremitlerin üretiminde jeolojik olarak çoğunlukla denizel olmak üzere, denizel ve karasal kökenli hammadde karışımı kullanılmış olmalıdır.

HARÇ VE SIVA/SIVA KATI ÖRNEKLER

Sivrihisar Ulu Cami duvar örgü derz ve moloz dolgularından örneklenen harçlar ile duvar yüzeylerini örten sıvaların asidik agrega/bağlayıcı analizi ile toplam agrega oranları belirlenmiştir. Harç örneklerin toplam agrega (karbonat içermeyen) içerikleri %5,30-94,67 arasında (ort. %71,01), sıvaların ise %5,17-76,68 arasında (ort. %59,06) değişim göstermektedir (Tablo 5a,5b). Sadece toplam agrega/bağlayıcı oranları açısından yapılacak bir değerlendirme ile harç ve sıvaların benzer oranlarda ve yüksek agrega (karbonat içermeyen) içeriklerinin bulunduğu belirlenmiştir (Tablo 5a,5b). Harçlardan ESU-H26, sıvalardan da ESU-S7 ve ESU-S10 örnekleri gruplarının genel özelliklerinin dışında düşük oranda toplam agrega içeriğine sahiptirler (Tablo 5a,5b). Harç ve siva/siva katı örneklerinin toplam agrega oranları, geleneksel/standart uygulamalarda görülen 2:1 (agrega:bağlayıcı) karışım oranıyla genel olarak uyumluluk göstermektedir.

Sivrihisar Ulu Cami'nin duvar örgü yüzeylerini örten sıvalarla derz ve moloz dolgularından örneklenerak asidik agrega/bağlayıcı analizine tabi tutulan harç örneklerinden işlem sonrası elde edilen agregalar, sistematik elemelerden geçirilerek granülometrik ayrımları $<63 \mu\text{m} - 1000 < \mu\text{m}$ elek aralığında 6 farklı bölümlenme ile yapılmıştır (Tablo 5a,5b). Harç örneklerde kil/silt ($<63 \mu\text{m} \varnothing$) boyutlu agrega oranı %0,83-20,87 arasında (ort. %4,13), sıvalarda da %0,88-26,92 arasında (ort. %3,69) değişim göstermektedir (Tablo 5a,5b). Harç ve siva örnekler oldukça benzer ve düşük oranlarda (harçlarda ESU-H26 ve sıvalarda ESU-S7 dışında) kil/silt içeriğe sahiptirler. Harçların ana agrega içeriğini ince/ortalama/iri/çok iri kum boyutundaki ($125-1000 \mu\text{m}$ ve $>1000 \mu\text{m} \varnothing$) agregalar, sıvaların ise ortalama/iri/çok iri kum boyutundaki ($250-1000 \mu\text{m}$ ve $>1000 \mu\text{m} \varnothing$) agregalar oluşturmaktadır (Tablo 5a,5b) (Wentworth, 1922). Harç örneklerin çok iri kum boyutlu ($>1000 \mu\text{m} \varnothing$) agrega içerikleri %8,73-55,43 arasında (ort. %31,20), sıvaların ise %19,89-46,12 arasında (ort. %35,31) değişmektedir (Tablo 5a,5b). Analiz edilen harç ve siva/siva katı örneklerinin silt/kum boyutlu agrega içeriğini de toplam kil/silt, iri/çok iri kum boyutu oranları dışındaki agrega oranı (%100'e tamamlanan oranda) oluşturmaktadır (Tablo 5a,5b).

Sivrihisar Ulu Cami'den örneklenen harç ve sıvaların agrega/bağlayıcı içeriklerinde belirlenen benzerlikler, ya bu uygulamaların aynı döneme ait uygulamalar olduğuna, ya da yapısal örneklerde geleneksel bir uygulamanın sürdürüldüğüne işaret eder niteliktedir.

Cami harç ve siva/siva katı örnekleri asidik agrega/bağlayıcı analizinden geçirildikten sonra elde edilen agregalarının içeriği ve tanecik türleri binoküler mikroskop altında incelenmiştir. Harç ve sıvaların bünyesindeki agregaların yakın çevre akarsu yatağına ait, yoğunlukla yuvarlanmış beraberinde daha az oranda kırıklı köşeli fiziksel yapıda, iri boyutlu agregaları içerdiği anlaşılmıştır. Yapısal nitelik taşıyan harç ve sıvaların agrega içeriklerinde benzer ve belli tanecik boyları tercih edilerek (eleme yapılarak) uygulamaların yapıldığı anlaşılmıştır.

Camiye ait harç ve siva/siva katı örnekleri, ince kesit optik mikroskop analizi ile petrografik yönden detaylı olarak incelenmiştir. Agregabağlayıcı bileşimleri incelenen harç örnekler 7, siva örnekler de 5 grup altında sınıflandırılmıştır (Tablo 6c,6d). Harç ve sıvaların bağlayıcı içeriğini kireç ile kireç/kil ve kireç/çimento karışımının oluşturduğu belirlenmiştir (Tablo 6c,6d). Onarım niteliği taşıyan harç ve siva örneklerin bağlayıcı yapısında çimento içerikli bağlayıcılar (Harç Gr6 ile Siva Gr1 ve Siva Gr3 örneklerinde) belirlenmiştir. Ayrıca bağlayıcı yapısında alçının da olduğu dekoratif nitelik taşıyan harç örnekler de (Harç Gr7) örnek seti içinde belirlenmiştir. İnce kesit optik mikroskop analizi ile incelenen yapısal nitelik taşıyan harç ve sıvaların bağlayıcı ve agrega yapılarının oldukça benzer ve homojen bir içerik sergilediği anlaşılmıştır. Yapısal nitelik taşıyan harç örneklerin agrega içeriğinde toplam agreganın %2 ve %10'unu tuğla kırığı parçalarının oluşturduğu da belirlenmiştir (Tablo 6c).

Ayrıca harç ve siva/siva katı örneklerinin agrega içeriğinde bitkisel kökenli kıtığın da

(toplam agreganın %2, %3 ve %4'ü oranlarında) yapıya tutuculuğu artırmak adına eklendiği anlaşılmıştır (Tablo 6d). Harç ve sıvalarda genel anlamda düşünüldüğünde belirlenen yapısal (petrografik) içerik benzerliğini, uygulama yaklaşımı, aynı dönem veya aynı kaynaklardan elde edilen hammadde kullanımı ile açıklamak mümkündür.

Yapısal harç ve siva örneklerin agregalarının petrografik analizleri dikkate alındığında; farklı türlerde sedimanter ve volkanik mineral/kayaçları birlikte içeren, yakın çevre akarsu yatağına ait, iri kum boyutunda ve küçük taş parçaları içeren, yuvarlanmış agregalı yapı sergilediği görülmektedir.

Camiden örneklenen harç ve siva/sıva katı örneklerinin kimyasal bileşimlerine PED-XRF analizi ile ulaşılmıştır. Harç örneklerin ana (>%1) element içeriğini azalan oranda SiO₂ (ort. %30,50), CaO (ort. %26,06), LOI (toplam karbonat, ort. %25,59), Al₂O₃ (ort. %5,80), Fe₂O₃ (ort. %3,87), K₂O (ort. %1,44) ve MgO (ort. %1,11), sıvalar ise CaO (ort. %47,13), LOI (ort. %43,20), SiO₂ (ort. %5,37), Al₂O₃ (ort. %1,31) ve Fe₂O₃ (ort. %1,31) oluşturmaktadır. İnce kesit optik mikroskop analizini destekler nitelikte harç örneklerinin petrografik yapılarında görülen farklılıklar, örneklerin kimyasal içeriklerinde de açıkça izlenebilmektedir. Ana element içeriklerine göre siva örnekler harçlara göre daha homojen bir yapı sergilemektedir. Bununla beraber PED-XRF analizi sonuçları değerlendirildiğinde, ESU-H19 örneğinin alçı içeriğinden kaynaklanan yüksek SO₃ ile Zr içeriği, ESU-H15 ve ESU-H25 örneklerinin de yüksek U (uranyum) içerikleri dikkat çekicidir.

Harç ve siva örnekler ana element (>%1) içerikleri ile kendi örnek setileri içinde değerlendirildiğinde; harçların en az 2, sıvaların ise tümüyle tek kaynağa yönelik hammadde içerdiği görülmektedir (Şekil 2c,2d).

Cami harç ve siva/sıva katı örneklerinin PED-XRF analizi ile elde edilen kimyasal verilerini kullanarak aynı örneklerin Çimentolaşma Endeksi - Cementation Index (CI) değerlerine de ulaşılabilmektedir (Tablo 7). Sıvaların dayanım özellikleri ve kireç türleri hakkında fikir veren bu veriler, örneklerin hidrolizlik özelliklerinin anlaşılmasına da vesile olmaktadır. Harç örneklerinin CI değerleri 0,46-21,53 arasında (ort. 8,05), sıvaların ise 0,06-0,85 arasında (ort. 0,43) yer almaktadır. Harçlardan ESU-H1, ESU-H3, ESU-H5 ve ESU-H12 örnekleri diğer örneklerden oldukça yüksek CI verisi (DÇ/Ç) sunmaktadırlar (Tablo 7). Harç örneklerin kireç türleri ZHK, OHK, HK, DÇ ve DÇ/Ç, sıvaların kireç türleri de YK, ZHK, OHK, HK kategorisindedir (Tablo 7). CI verileri örneklerin dayanım özellikleri bakımından da doğrudan fikir vermektedir. CI verileri yüksek örneklerin hidrolizlik ve dayanım özellikleri de yüksektir. Buradan hareketle harç ve siva/sıva katı örneklerinin dayanımlarının DÇ/Ç kategorisindeki yukarıda anılan örnekler için oldukça yüksek olduğunu söylemek mümkündür.

4. SONUÇLAR

Camide yapıtaşı olarak yoğunlukla kireçtaşı ve monzonit türü taşların kullanıldığı, yanında mermerin de dekoratif amaçlı olarak kullanılmış olduğu anlaşılmıştır. Yapıya ait yapısal kayaçlar yerel formasyona ait taş kaynaklarından elde edilmiştir. Taş ve tuğla örneklerin yüksek miktarlarda karbonat, düşük miktarlarda fosfat, sülfat ve klorür türlerinde tuzlanmalar içerdiği belirlenmiştir. Agregata ve matriks özelliklerine sınıflandırılan tuğla örnekler 8, kiremit örnekler de 4 grup altında, toplamda 10 farklı grup halinde (üretim merkezi ya da hammadde farklılığı taşıyan teknoloji ile) sınıflandırılmıştır. Örneklerin gözenekliliği, karbonat içeriği ve kil yapısı göz önüne alınarak genel olarak 750-950°C arasında değişen pişirimler uygulanarak üretilmişlerdir. Tuğla ve kiremit örneklerin kimyasal yapıları dikkate alındığında üretimlerinde denizel ve karasal kökenli killerin birlikte hammadde olarak kullanıldığı anlaşılmıştır. Camide derz ve dolgulamalarda kullanılmış olan harçların çoğu özgün olmasına rağmen yakın dönemde uygulanmış olan

onarım da petrografik analizler ile belirlenmiştir. Yapıda kullanılmış olan özgün nitelikteki harçlar kireç ve kireç/kil içerikli harçlardır. Onarım niteliği taşıyan harç ve sıva örneklerin bağlayıcı yapısında çimento içerikli bağlayıcılar (Harç Gr6 ile Sıva Gr1 ve Sıva Gr3 örneklerinde) belirlenmiştir. Bu harçlar yapıda ilişkili oldukları malzemelerde tuzlanma etkisini artırmışlardır. Kimyasal analiz sonuçlarına göre harçlar en az 2, sıvalar ise tümüyle tek kaynağa yönelik ham madde içerdiğine sahiptir. Harç ve sıvaların agrega yapılarında tuğla kırığı ve organik (saman vb.) katkılara da rastlanılmıştır. Harç ve sıva/sıva katı örneklerinin toplam agrega oranları, geleneksel/standart uygulamalarda görülen karışım oranıyla genel olarak uyumluluk göstermektedir.

Sahip olduğu değerlerle Sivrihisar Ulu Cami Selçuklu mimarisinin tüm özelliklerini taşıyan nadide bir yapıdır. Bu nedenle gerçekleştirilen arkeometrik çalışmalar, caminin hem yapısal malzeme olarak belgelenmesine hem de aslına uygun olarak korunmasına hizmet edecek restorasyon çalışmalarına önemli bir katkı sağlamıştır.

TEŞEKKÜR VE DESTEKLER

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından (BAP Proje No: 44/2015-01) desteklenmiştir. Analizler için, Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve İnceleme Merkezi (YEBİM)'nden Prof. Dr. Yusuf Kağan Kadioğlu ve Dr. Kıymet Denize, Gazi Üniversitesi'nden (MAKLAB) Gülşen Albuz Geren ve Dr. Murat Eroğlu'na yardımları için teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

Akyol, A.A., Kadioğlu, Y.K., 2010, "Sivrihisar Ulu Cami Arkeometrik Çalışmaları", XII. Ortaçağ Türk Dönemi Kazıları ve Sanat Tarihi Sempozyumu, 15-17 Ekim 2008, Çanakkale, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Yayınları No: 98, İzmir, s. 229-239.

Altınsapan, E., Parla C., 2004, Eskişehir Selçuklu ve Osmanlı Yapıları 1, Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.

Aslanapa, O., 1984, Türk Sanatı I-II, Başlangıcından Beylikler Devri Sonuna Kadar, Ankara.

Black, C. A., Evans, D. D., Ensminger, L. E., White, J. L., Clark, F. E., 1965, Methods of Soil Analysis No. 9 in the Series Agronomy, American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA.

Brady, N.C., Weil, R.R., 2004, Elements of the Nature and Properties of Soils, 2nd ed., Pearson and Prentice Hall, New Jersey, 96.

Boynton, R.S., 1980, Chemistry and Technology of Lime and Limestone, 2nd ed, John Wiley & Sons, Inc., New York, 578 p.

Dursun, H., Dizdar, M.Y., Kırıştioğlu, Ş., Özcan, İ., Hamurkar, Y., 2008, Toprak ve Arazi Sınıflaması Standartları Teknik Talimatı ve İlgili Mevzuat, Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Tarımsal Üretim ve Geliştirme Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara, s. 70.

Feigl, F., 1966, Spot Test in Organic Analysis, Elsevier Publication Company, Amsterdam.

Kerr, P.F., 1977, Optical Mineralogy, McGraw-Hill Co. First Ed'n., New York.

Means, R.E., Parcher, J.V., 1963, Physical Properties of Soils, Charles E. Merrill Publishing Co., Columbus, Ohio, USA.

Otto-Dorn, K., 1967, "Die Ulu Dschami In Sivrihisar", Anadolu (Anatolia), IX, Ankara, s. 161-168.

Özışık, G., 2000, Yapı Mühendisliğinde Tuğla Elemanlar ve Yapı Sistemleri, Birsen Yayınevi, İstanbul.

RILEM, 1980, Research and Testing, Materials and Construction 13, Chapman and Hall, Paris, p. 73.

Rapp, G., 2002, Archaeomineralogy, Springer-Verlag, Berlin.

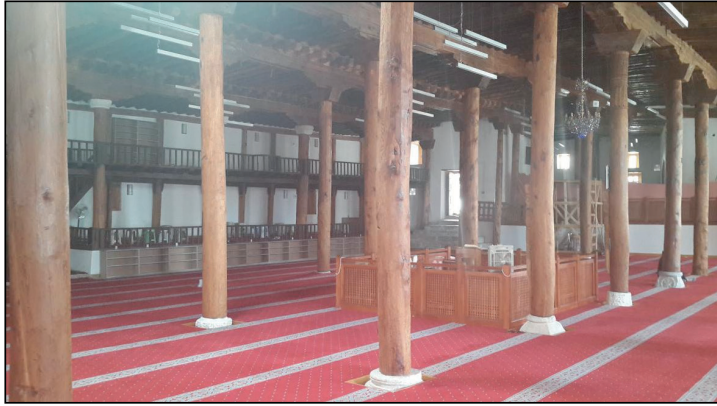
Shackley, M.S. (Ed.), 2011, X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology, DOI 10.1007/978-1-4419-6886-9-2, Springer Publication.

TSE / Türk Standartları Enstitüsü, 2007, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler, Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini - Eleme Metodu. (TS 3530 EN 933-1/ Nisan 1999 / Şubat 2007). Ankara.

Wentworth, C.K., 1922, A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments, Journal of Geology, Vol. 30, p. 377-392.

Web: Anadolu Selçuklu Envanteri, Erişim Tarihi: 30.12.2015,

<http://www.anadoluselcuklumimarisi.com/fisdetay.asp?id=224>



Şekil 1. Sivrihisar Ulu Camii dıştan (üstte, güney cephe) ve içten (harim) görünümü (05.09.2015)

Tablo 1. Sivrihisar Ulu Cami yapı malzemeleri proje örnekleme

Grup Kodu*	Yapısal Malzeme Grubu Açıklamalar	Örnek Sayısı
ESU-T	Taş Örnekler (Duvar örgülerden)	8
ESU-B	Tuğla ve Kiremit Örnekler (Duvar örgülerden)	35
ESU-H	Harç Örnekler (Taş/tuğla duvar derz/moloz dolgusundan)	27
ESU-S	Sıva Örnekler (Taş/tuğla duvar yüzeylerinden)	17

(*) Kodlama Ön Ek : **ESU** (= Eskişehir Sivrihisar Ulu Cami; ESU-T1, 1 Nolu taş örneğini ifade etmektedir)

Tablo 2. Sivrihisar Ulu Cami taş, tuğla ve kiremit örneklerinde fiziksel testler

Örnekler	BHA-Doygun (g/cm ³)	BHA-Kuru (g/cm ³)	SEK (%)	P (%)	Malzeme Türü	
ESU-T1	2,84	2,75	1,14	3,13	Monzodiyorit	
ESU-T3	2,77	2,34	6,69	15,63	P. Kireçtaşı	
ESU-T4	2,54	2,21	5,86	12,97	P. Kireçtaşı	
ESU-T5	2,55	2,52	0,52	1,32	D. Mermer	
ESU-T6	2,82	2,40	6,34	15,18	Monzonit	
ESU-T7	2,69	2,46	3,45	8,49	P. Kireçtaşı	
ESU-T8	2,82	2,77	0,68	1,88	Monzonit	
ESU-B1	2,60	1,97	12,35	24,31	Tuğla	
ESU-B4	2,43	1,66	19,04	31,65		
ESU-B5	2,88	1,48	32,71	48,48		
ESU-B7	2,88	1,96	16,32	31,98		
ESU-B9	2,47	1,68	19,12	32,05		
ESU-B11	2,69	1,94	14,27	27,74		
ESU-B12	2,43	1,68	18,30	30,83		
ESU-B14	2,75	1,55	27,98	43,49		
ESU-B15	2,48	1,85	13,79	25,50		
ESU-B16	2,66	1,87	15,92	29,72		
ESU-B17	2,54	1,80	16,06	28,94		
ESU-B18	2,58	1,86	15,08	27,98		
ESU-B19	2,26	1,79	11,55	20,72		
ESU-B20	2,56	1,85	14,94	27,70		
ESU-B21	2,44	1,65	19,68	32,41		
ESU-B22	2,62	1,74	19,38	33,70		
ESU-B24	2,73	1,78	19,73	35,05		
ESU-B25	2,50	1,67	19,81	33,12		
ESU-B26	2,40	1,62	19,98	32,39		
ESU-B27	2,67	1,68	22,14	37,12		
ESU-B28	2,63	1,61	23,97	38,67		
ESU-B29	2,55	1,94	12,38	23,99		
ESU-B30	2,35	1,78	13,50	24,05		
ESU-B34	2,57	1,91	13,65	26,01		
ESU-B35	2,23	1,55	19,72	30,52		
Tuğla Ort.	2,56	1,75	18,05	31,12		
ESU-B2	2,84	1,66	24,89	41,37		Kiremit
ESU-B3	2,66	1,62	24,16	39,16		
ESU-B6	2,27	1,44	25,29	36,47		
ESU-B8	2,85	1,69	23,94	40,58		
ESU-B10	2,58	1,92	13,41	25,71		
ESU-B13	2,76	1,71	22,39	38,19		
ESU-B31	2,49	1,87	13,38	25,03		
ESU-B32	2,70	1,64	23,79	39,12		
ESU-B33	2,47	1,86	13,34	24,77		
Kiremit Ort.	2,63	1,71	20,51	34,49		

Tablo 3. Sivrihisar Ulu Cami taş, tuğla ve kiremit örneklerinde kondaktometrik iletkenlik analizi değerleri (Suda çözünen toplam tuz miktarı; % SS)

Örnekler	SS (%)	Malzeme Türü
ESU-T1	1,99	Monzodiyorit
ESU-T3	1,85	P. Kireçtaşı
ESU-T4	1,94	P. Kireçtaşı
ESU-T5	0,53	D. Mermer
ESU-T6	1,26	Monzonit
ESU-T7	0,39	P. Kireçtaşı
ESU-T8	1,29	Monzonit
Taş Ort.	1,32	Taş Türü
ESU-B2	1,24	Kiremit
ESU-B3	1,38	
ESU-B6	1,45	
ESU-B8	2,22	
ESU-B10	2,39	
ESU-B13	1,51	
ESU-B31	1,34	
ESU-B32	1,36	
ESU-B33	1,38	
Kiremit Ort.	1,59	
ESU-B1	2,63	
ESU-B4	1,38	
ESU-B5	1,97	
ESU-B7	0,50	
ESU-B9	2,40	
ESU-B11	1,51	
ESU-B12	1,46	
ESU-B14	1,32	
ESU-B15	1,64	
ESU-B16	2,10	
ESU-B17	2,09	
ESU-B18	2,07	
ESU-B19	2,06	
ESU-B20	3,03	
ESU-B21	1,52	
ESU-B22	1,36	
ESU-B24	3,08	
ESU-B25	1,24	
ESU-B26	1,41	
ESU-B27	1,41	
ESU-B28	1,26	
ESU-B29	1,51	
ESU-B30	1,24	
ESU-B34	1,29	
ESU-B35	1,33	
Tuğla Ort.	1,71	

Tablo 4. Sivrihisar Ulu Cami taş, tuğla ve kiremit örneklerde spot testler ve pH değerleri

Örnekler	Fosfat (PO ₄ ³⁻)	Sülfat (SO ₄ ²⁻)	Klorür (Cl)	Karbonat (CO ₃ ²⁻)	pH	Malzeme Türü
ESU-T1	-	-	3	192	8,21	Taş Örnekler
ESU-T3	-	20	6	192	8,13	
ESU-T4	-	20	6	192	7,67	
ESU-T5	-	-	3	400	7,92	
ESU-T6	-	-	3	192	7,38	
ESU-T7	-	-	3	192	8,01	
ESU-T8	-	-	3	192	8,14	
ESU-B1	-	-	18	112	7,27	
ESU-B2	0,60	-	3	112	7,83	
ESU-B3	0,20	-	3	112	7,56	
ESU-B4	0,20	-	3	112	7,34	
ESU-B5	-	-	3	112	7,22	
ESU-B6	-	-	3	112	7,08	
ESU-B7	-	-	3	112	7,13	
ESU-B8	0,60	-	3	112	7,21	
ESU-B9	-	-	3	112	7,59	
ESU-B10	-	-	3	112	7,41	
ESU-B11	0,20	-	3	112	7,41	
ESU-B12	-	-	3	112	7,47	
ESU-B13	-	-	3	112	7,62	
ESU-B14	-	-	3	192	7,43	
ESU-B15	0,20	-	3	112	7,52	
ESU-B16	0,20	-	3	112	7,62	
ESU-B17	0,20	-	3	112	7,53	
ESU-B18	0,20	-	3	112	7,66	
ESU-B19	0,20	-	3	192	7,65	
ESU-B20	0,20	-	3	192	7,51	
ESU-B21	0,20	-	6	192	7,58	
ESU-B22	0,20	-	3	192	7,58	
ESU-B24	-	-	6	192	7,28	
ESU-B25	-	-	3	112	7,75	
ESU-B26	-	20	6	112	7,22	
ESU-B27	0,60	-	6	192	7,06	
ESU-B28	0,20	20	3	112	7,58	
ESU-B29	-	20	3	112	7,72	
ESU-B30	-	-	6	112	7,71	
ESU-B31	0,20	-	6	112	7,76	
ESU-B32	-	-	3	112	7,69	
ESU-B33	-	-	3	112	7,65	
ESU-B34	0,40	-	3	112	7,73	
ESU-B35	0,20	-	3	112	7,79	

(*) Testlerin Hassasiyeti; (PO₄³⁻): 0,10 mg/L, (SO₄²⁻): 20 mg/L, (Cl): 3 mg/L, (CO₃²⁻): 4 mg/L (***) 100 mL suda

Tablo 5a. Sivrihisar Ulu Cami harç örneklerinde agrega/bağlayıcı ve granülometrik analizler

Örnekler	TB (%)*	TA (%)*	<63 µm	>63 µm	>125 µm	>250 µm	>500 µm	>1000 µm
ESU-H1	12,50	87,50	3,40	21,41	21,40	16,91	13,58	23,29
ESU-H2	26,19	73,81	1,57	2,73	7,16	14,34	23,14	51,05
ESU-H3	5,40	94,60	4,42	29,75	24,56	13,04	10,44	17,80
ESU-H4	28,59	71,41	1,56	4,22	11,07	18,02	30,00	35,13
ESU-H5	7,23	92,77	5,58	21,37	23,37	15,29	12,56	21,84
ESU-H6	10,90	89,10	5,11	20,25	22,73	17,19	12,63	22,08
ESU-H7	21,90	78,10	1,76	6,21	12,53	16,81	17,82	44,86
ESU-H8	32,41	67,59	6,01	14,57	22,13	18,02	15,51	23,75
ESU-H9	28,19	71,81	7,59	12,42	16,88	18,41	20,27	24,44
ESU-H10	7,10	92,90	5,15	22,60	27,24	19,15	11,96	13,91
ESU-H11	39,12	60,88	1,25	2,59	7,50	16,63	29,97	42,05
ESU-H12	5,33	94,67	6,22	18,03	21,25	17,82	15,48	21,20
ESU-H13	46,75	53,25	1,83	5,18	13,88	21,26	23,08	34,77
ESU-H14	49,57	50,43	9,62	16,69	15,33	16,18	20,02	22,16
ESU-H15	33,12	66,88	2,50	7,14	19,98	23,58	18,92	27,88
ESU-H16	17,52	82,48	3,12	5,85	8,37	11,73	15,51	55,43
ESU-H17	32,13	67,87	1,61	4,26	11,58	16,49	22,68	43,37
ESU-H18	32,56	67,44	10,01	17,51	19,93	20,22	17,94	14,39
ESU-H19	16,47	83,53	1,06	5,19	15,03	19,05	27,30	32,37
ESU-H20	32,03	67,97	1,66	5,98	13,76	20,93	19,86	37,80
ESU-H21	23,59	76,41	1,10	3,59	9,11	14,80	22,56	48,84
ESU-H22	42,59	57,41	2,04	6,24	16,01	21,20	20,47	34,03
ESU-H23	32,11	67,89	1,45	5,85	16,22	22,31	24,18	29,99
ESU-H24	31,53	68,47	2,29	6,48	17,37	24,22	21,86	27,77
ESU-H25	38,18	61,82	2,01	5,99	15,06	20,22	21,53	35,19
ESU-H26	94,70	5,30	20,87	18,29	19,28	17,77	15,05	8,73
ESU-H27	34,93	65,07	0,83	1,96	5,58	15,65	27,71	48,26
Ortalama	28,99	71,01	4,13	10,83	16,09	18,05	19,70	31,20

Tablo 5b. Sivrihisar Ulu Cami sıva örneklerinde agrega/bağlayıcı ve granülometrik analizler

Örnekler	TB (%)*	TA (%)*	<63 µm	>63 µm	>125 µm	>250 µm	>500 µm	>1000 µm
ESU-S1a	23,32	76,68	0,88	2,46	6,94	18,01	42,63	29,08
ESU-S1b	28,24	71,76	1,13	3,01	8,64	16,37	26,17	44,68
ESU-S1c	56,53	43,47	2,73	6,67	14,86	21,62	22,41	31,70
ESU-S2a	48,28	51,72	1,28	3,07	7,64	17,14	24,76	46,12
ESU-S2b	35,96	64,04	1,31	3,44	10,00	18,66	26,85	39,74
ESU-S2c	27,49	72,51	1,63	6,77	17,26	24,99	23,55	25,80
ESU-S3a	25,36	74,64	1,32	3,85	9,43	15,83	28,20	41,37
ESU-S3b	48,34	51,66	2,95	8,16	14,61	21,21	23,10	29,97
ESU-S3c	26,17	73,83	0,88	1,86	5,77	16,24	30,95	44,31
ESU-S4	37,37	62,63	1,66	4,25	9,89	16,85	24,98	42,36
ESU-S5	31,41	68,59	1,75	4,22	9,80	16,65	22,03	45,56
ESU-S6	36,03	63,97	2,60	7,07	19,40	26,83	24,21	19,89
ESU-S7	94,83	5,17	26,92	6,98	10,60	14,33	16,48	24,70
ESU-S8	23,98	76,02	1,64	6,63	10,64	20,63	29,58	30,88
ESU-S9	26,59	73,41	1,41	6,99	17,26	22,16	21,25	30,93
ESU-S10	94,17	5,83	10,81	10,94	17,80	16,88	12,39	31,17
ESU-S11	31,88	68,12	1,90	5,04	10,66	17,34	23,05	42,02
Ortalama	40,94	59,06	3,69	5,38	11,83	18,93	24,86	35,31

(*) TB: Toplam Bağlayıcı Oranı, TA: Toplam Agregası Oranı

Tablo 6a. Sivrihisar Ulu Cami taş örneklerinin petrografik özellikleri

Taş Örnek	Kayaç Türü	Sertlik (Mohs)	Açıklamalar
ESU-T1	Monzodiyorit	5,5 - 6	Holokristalin tanesel dokulu yapıda amfibol, plajiyoklas, piroksen, ortoklas ve opak mineraller yer alıyor.
ESU-T2 ESU-T5	Diyopsit Mermer	2,5 - 3	Granoblastik dokulu yapıyı tane boyutu 0,7 mm'den büyük diopsit ve kalsit mineralleri oluşturuyor.
ESU-T3 ESU-T4 ESU-T7	Pelajik Kireçtaşı	2,5 - 3	Mikritik dokulu başlıca kalsit içeren yapıda az oranda aragonit ile fosil ve fosil kavkaları yer alıyor.
ESU-T6 ESU-T8	Monzonit	5,5 - 6	Holokristalin tanesel dokulu yapıda kuvars, amfibol, plajiyoklas, biyotit ve uralitlemiş piroksen mineralleri yer alıyor.

Tablo 6b. Sivrihisar Ulu Cami tuğla ve kiremit örneklerinin petrografik özellikleri

Tuğla ve Kiremit Örnekler	T (°C)	P (%)	MTA (%) & Boyut**	Kayaç ve Mineraller*	Kayaç Kökeni
Tuğla Gr1	800-850	5	65 Orta	Q,Pl,Ç,Py,Am,By, Mk,Or,TK(%2)	Monzonit
Tuğla Gr2	850-900	6	70 İri	Q,Pl,By,Py,Am,Op	
Tuğla Gr3	900-950	6	55 Orta	Q,Pl,Or,Op,By,Py,Am	
Tuğla Gr4	750-800	5	45 İri	Q,Pl,By,Am,Py,Or	
Tuğla Gr5	850-900	6	15 İnce	Q,Pl,By,TK(%2)	Andezit
Tuğla Gr6	800-850	3	65 İri	Q,Pl,By,Op, Am,Py,Or,Mk	Monzonit
Tuğla Gr7	900-950	8	40 İri	Q,Pl,G,Py,Am,Op	
Tuğla Gr8	750-800	8	25 İnce	Q,Pl,Ç,By,Ms,TK(%1,5)	Piroklastik Kayaçlar
Tuğla Gr9	900-950	6	15 Orta	Q,Pl,By,Am, Py,Op,TK(%1,5)	Monzonit
Tuğla Gr10	850-900	5	45 İri	Q,Pl,G,Or,By,Am	

(**) İnce / Orta / İri Boyutlu Agregası (mm) : <0,5 / 0,5-1,0 / >1,0

Tuğla Gr1 : ESU-B1, ESU-B9, ESU-B20, ESU-B26, ESU-B32*

Tuğla Gr2 : ESU-B2*, ESU-B6*, ESU-B7, ESU-B11, ESU-B12, ESU-B13, ESU-B16, ESU-B24, ESU-B28, ESU-B34

Tuğla Gr3 : ESU-B3*, ESU-B8*

Tuğla Gr4 : ESU-B4, ESU-B14, ESU-B15, ESU-B23

Tuğla Gr5 : ESU-B5, ESU-B21

Tuğla Gr6 : ESU-B10*, ESU-B17, ESU-B18, ESU-B19, ESU-B29, ESU-B30, ESU-B33*

Tuğla Gr7 : ESU-B22, ESU-B35

Tuğla Gr8 : ESU-B25

Tuğla Gr9 : ESU-B27

Tuğla Gr10 : ESU-B31*

(*) Kiremit örnekler

Tablo 6c. Sivrihisar Ulu Cami harç örneklerinin petrografik özellikleri

Harç Örnekler	MTB (%)	MTA (%)	Matriks Bağlayıcı İçeriği (%100)				Matriks Agrega İçeriği (%100)		
			Kireç	Kil	Çm	Alçı	Kayaç & Mineraller*	TK	Org
Harç Gr1	65	35	100	-	-	-	100 (Q,Pl,By,Am,Py,Mn)	-	-
Harç Gr2	64	36	90	10	-	-	100 (Q,Pl,By,P)	-	-
Harç Gr3	15	85	80	20	-	-	100 (Q,K,Pl,Am,By,C)	-	-
Harç Gr4	62	38	75	25	-	-	100 (Q,Pl,By,Am,Py,Op)	-	-
Harç Gr5	35	65	85	15	-	-	90 (Q,Pl,Mn,By,Am,Or)	10	-
Harç Gr6	10	90	35	-	65	-	100 (Q,K,Mn,Pl,By,Am,Py)	-	-
Harç Gr7	88	12	55	20	-	25	96 (Q,Pl,Ç)	2	2

Harç Gr1 : ESU-H1, ESU-H2, ESU-H3, ESU-H7, ESU-H10, ESU-H12, ESU-H15, ESU-H17, ESU-H22, ESU-H23, ESU-H24, ESU-H25

Harç Gr2 : ESU-H4, ESU-H13, ESU-H20, ESU-H21

Harç Gr3 : ESU-H5

Harç Gr4 : ESU-H6, ESU-H18

Harç Gr5 : ESU-H8, ESU-H9, ESU-H14

Harç Gr6 : ESU-H11, ESU-H16, ESU-H27 (Onarım)

Harç Gr7 : ESU-H19, ESU-H26

Tablo 6d. Sivrihisar Ulu Cami siva örneklerinin petrografik özellikleri

Siva Örnekler	MTB (%)	MTA (%)	Matriks Bağlayıcı İçeriği (%100)				Matriks Agrega İçeriği (%100)		
			Kireç	Kil	Çm	Alçı	Kayaç & Mineraller*	TK	Org
Siva Gr1	35	65	60	-	40	-	100 (Q,Pl,By,Py, K,Mn,Mk,Am)	-	-
Siva Gr2	60	40	100	-	-	-	100 (Q,Pl,By,Py, Am,Mk,Or,Op)	-	-
Siva Gr3	40	60	35	-	65	-	100 (Q,K,Pl,By, Am,Py,F,Qs,Ç,M)	-	-
Siva Gr4	45	55	100	-	-	-	97 (Q,K,Pl,By, Am,Py,F,Qs,Ç,M)	-	3
Siva Gr5	85	15	100	-	-	-	96 (Q,K,Pl,Ç)	-	4

Siva Gr1 : ESU-S1a, ESU-S3a (Onarım)

Siva Gr2 : ESU-S1b, ESU-S2b, ESU-S1c, ESU-S2c, ESU-S3b, ESU-S3c

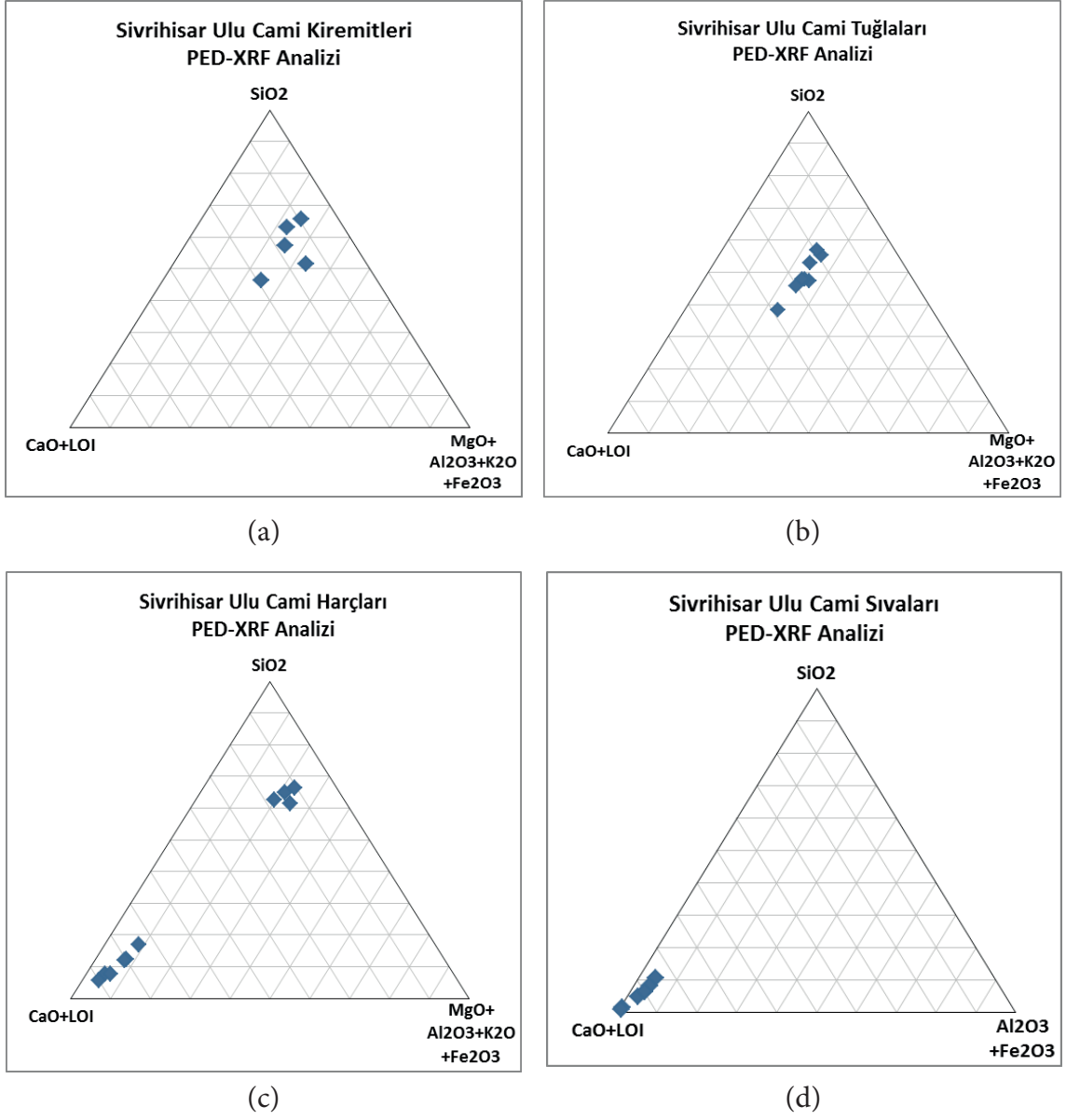
Siva Gr3 : ESU-S2a, ESU-S8, ESU-S9, ESU-S11 (Onarım)

Siva Gr4 : ESU-S4, ESU-S5

Siva Gr5 : ESU-S6, ESU-S7, ESU-S10

(*) Am: Amfibol, By: Biyotit, C: Kalsit, Ç: Çört, Çm: Çimento, F: Fosil ve Fosil Kavkuları, G: Granit, K: Kireçtaşı, M: Mermer, Mk: Mikroklin, Mn: Monzonit, Ms: Muskovit, MTA: Matriks Toplam Agrega Oranı, Op: Opak Mineraller, Or: Ortoklas, Org: Organik İçerik, P: Pomza, Pl: Plajiyoklas, Py: Piroksen, Q: Kuvars, Qs: Kuvarsit, TK: Tuğla Kırığı Parçaları

Şekil 2. Sivrihisar Ulu Cami (a) kiremit, (b) tuğla, (c) harç ve (d) sıva örnekleri XRF TP gruplamaları



Tablo 7. Sivrihisar Ulu Cami harç ve sıva örneklerinde Cementation Index verileri

Örnekler	CI	Kireç Türü
ESU-H1	14,30	DÇ/Ç*
ESU-H3	21,53	DÇ/Ç
ESU-H5	18,98	DÇ/Ç
ESU-H7	1,08	HK
ESU-H12	20,75	DÇ/Ç
ESU-H13	0,54	OHK
ESU-H15	0,46	ZHK
ESU-H17	0,64	OHK
ESU-H19	0,83	HK
ESU-H25	1,42	DÇ
Harç Ort.	8,05	DÇ/Ç

Örnekler	CI	Kireç Türü
ESU-S1a	0,85	HK
ESU-S1b	0,58	OHK
ESU-S1c	0,32	ZHK
ESU-S4	0,64	OHK
ESU-S7	0,09	YK
ESU-S10	0,06	YK
Sıva Ort.	0,43	ZHK

(*) Yağlı Kireç (YK) : <0,30, Zayıf Hidrolik Kireç (ZHK) : 0,30 - 0,50, Ortalama Hidrolik Kireç (OHK) : 0,51 - 0,70 Hidrolik Kireç (HK) : 0,71 - 1,10, Doğal Çimento (DÇ) : 1,11-1,70, Doğal Çimento & Çimento (DÇ/Ç) : 1,70<