

# ANADOLUDA BİZANS DÖNEMİ KALE YAPILARINDA KULLANILAN TUĞLALARIN FİZİKSEL, KİMYASAL ve MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

**Sedat Kurugöl ve Çiğdem Tekin**

Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, MSGSÜ, Fındıklı İstanbul  
sedatkurugol@gmail.com, cigdemad@hotmail.com

(Geliş/Received: 15.12.2009; Kabul/Accepted: 02.03.2010)

## ÖZET

Bu çalışmada Türkiye'nin farklı illerinde farklı iklim koşullarında yer alan, Bizanslılar döneminde inşa edilmiş olan kale yapılarında kullanılan tuğla malzemenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri araştırılmaktadır. Bu amaçla; araştırmada kullanılan olan tuğla örnekleri Trabzon, Kütahya, Amasra ve İstanbul'da yer alan Bizans dönemi kale yapılarından temin edilmiştir. Tuğlaların kimyasal kompozisyonu ICP-ES, mineralojik yapısı da XRD analizleriyle, mukavemet özellikleri ise mekanik testlerle tespit edilmiş, tuğlaların öğütülmüş toz boyutlu örnekleri üzerinde de puzolanik aktivite deneyleri yapılmıştır. XRD ve puzolanik aktivite analiz sonuçlarına göre, tüm tuğlaların düşük sıcaklıklarda pişirilmiş olup puzolanik özellik taşıdıkları görülmüştür. Kütahya kalesi tuğlaları düşük birim ağırlıklarına ve yüksek poroziteye sahip olup, mekanik özellikleri de diğer Kale tuğlalarına göre daha düşüktür. Trabzon Kalesinden alınan örnekler fiziksel ve mekanik özellikler açısından diğer örneklere göre üstün özelliklere sahiptirler. Yoros ve Amasra Kalesi tuğlalarının ise genel olarak birbirlerine yakın özellikler taşımaktadır. Yapılan ultrases hızı ölçümleri sonucunda, tarihi tuğlaların mekanik özelliklerinin tahribatsız yöntemlerle de tahmin edilebileceği belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Tarihi kaleler, tuğla, fiziko-kimyasal özellikler, mekanik özellikler, puzolanik aktivite, ultrases hızı.

## EVALUATION OF PHYSICAL, CHEMICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF BRICKS USED IN CASTLE STRUCTURES OF BYZANTINE PERIOD

### ABSTRACT

In this study, physical, chemical and mechanical characteristics of brick material used in castle structures of Byzantine period constructed in different cities and different climatic conditions of Turkey shall be analyzed. In this scope, brick samples analyzed in this study are provided from castle structures of Byzantine period constructed in Trabzon, Kütahya, Amasra and İstanbul. Chemical composition of bricks is identified by means of ICP-ES, their mineralogical structure is determined by XRD analysis, whereas mechanical tests are applied to observe their resistance and pozzolanic activity experiments are made on ground bricks having dimension of powder. According to results of XRD and pozzolanic activity analysis, entire bricks having kilned under low temperatures carry pozzolanic characteristics. Bricks of Kütahya castle have low unit weights and high porosity and their mechanical characteristic is lower than that of bricks of other castles. Samples taken from Trabzon Castle have superior characteristics when compared to other samples in terms of physical and mechanical properties. As for bricks of Yoros and Amasra Castle, they represent similar features. As a result of ultrasound speed measurements, it is analyzed that mechanical characteristics of historical castles can be estimated by means of nondestructive methods.

**Key words:** Historical castles, brick, physico-chemical characteristics, mechanical characteristics, pozzolanic activity, ultrasound speed.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanoğlunun parçalı gereçlerle yapı oluşturma serüveni mağara düzeninden, yerleşik topluluklar düzenine geçmesi ile başlar. Doğada bulunan taş, ahşap, saz, kamış gibi malzemelerle oluşturduğu ilk yapılar, bu malzemelerin bulunmadığı ya da az bulunduğu bölgelerde insanları arayış içine itmiştir. Sonuçta; çevresinde bolca bulunan toprağı yapıda kullanabilmek için onu biçimlendirip dayanıklı hale getirerek, kerpici bulmuştur. Kerpici uzun ömürlü olmaması, dış etkenlerden çabuk bozulması; killi toprağın pişirilmesi ile giderilmiştir. Böylece ilk tuğla gereci, insanlığa kazandırılmıştır. Tuğlalar genellikle yerel ve bölgesel hammadde kaynaklarından yararlanılarak, geleneksel ve amprık yöntemlerle şekillendirildikten sonra basit fırınlarda pişirilerek üretilmişlerdir. Bu süreç 19. yy kadar devam etmiştir.

Tuğla, dünya tarihinde imalatı yapılan ilk yapı malzemesidir. Kil ile suyun buluşması ve ateşle ile beraberliği tuğlanın doğuşunu oluşturmuştur. Çok eski çağlarda her bina önce bir tuğla üretim tesisi olmuş, üretilen tuğlalar daha sonra bu binanın yapımında kullanılmıştır. Şu halde ilk üretim tesisi, tuğladan yapılan ilk evdir. Mezopotamya'da tuğla ve tuğla üretimi Asurlular, Persler, Sasaniler ve İslam kültürü ile gelişmiş değişik boyutlara taşmıştır. Doğu ve batı kültürü hemen hemen ortak ilerlemiş, sonuçta tuğla tüm yerleşim bölgelerinin vazgeçilmez yapı malzemesi olma özelliğini korumuştur. Anadolu'ya bakıldığında burada da gelişmelerin yukarıdaki tarihlere paralel olarak gerçekleştiği görülmektedir. Anadolu'da ilk pişmiş tuğlanın endüstriyel anlamda üretim ve kullanımı M.Ö. 4. yüzyılda Lidyalılar tarafından başlatılmıştır ve bu dönem Babil kulesinin yapımı ile hemen hemen aynı dönemlere rastlamaktadır. Anadolu'da tuğlanın kullanımı Roma'dan Bizans'a, ondan da Türk Mimarlığı'na geçmiştir. Almasıık düzende taş ve tuğla dizilerinden meydana gelen duvar örgü tekniği de Roma'dan Bizans'a, ondan da Türkler'e geçmiştir. Bizanslılarda olduğu gibi Osmanlılarda tuğlalar yassıca ve oldukça büyük kullanılmıştır.

Doğu mimarlığının etkisinde kalan ve bu etki içinde gelişen Bizans mimarisi, bir tuğla mimarisidir. Bunun yanı sıra malzeme olarak taş, bazen taş ve tuğla birlikte (almasıık) kullanılmıştır. İstanbul ve Anadolu'nun birçok yerinde, şehirlerin etrafını çevreleyen surlar olmak üzere, kaleler, çeşitli saraylar, su kemerleri, köprüler, yer altı yolları, direkli caddeler, üzeri kapalı ya da açık sarnıçlar gibi pek çok Bizans sivil ve askerî yapılar inşa edilmiştir. Literatürde, Bizans mimarisinin örneklerinden olan kale yapılarında kullanılan tuğla malzeme ve özellikleri üzerinde kapsamlı çalışmaların yapılmadığı dikkati çekmekte ve dolayısıyla farklı bölgelerde bulunan Bizans dönemi kalelerinde kullanılmış olan tuğla malzemenin fiziko-kimyasal ve mekanik özelliklerinin

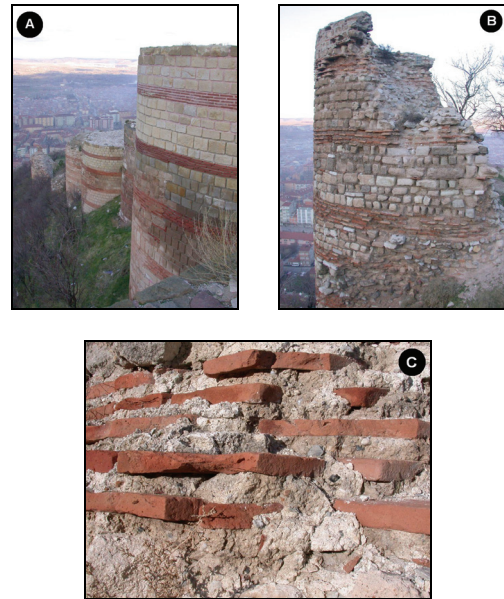
incelenmesi ve bu özelliklerin karşılaştırması bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

### 1.1 Kaleler Hakkında Genel Bilgiler (General Information About Castles)

Çalışmada kullanılan tuğla örneklerin temin edildiği kalelerle ilgili genel tarihi bilgiler ve tuğla malzemenin yapıda kullanım şekli hakkında bilgiler alt başlıklarda verilmektedir.

#### 1.1.1 Kütahya Kalesi (Kutahya Castle)

Kütahya Kalesi şehre hâkim bir tepe üzerinde inşa edilmiştir. Kalenin bulunduğu alanın antik çağdan itibaren ilk yerleşimin başladığı yer olduğu sanılmaktadır. Kaynaklara göre buradaki ilk kaleyi Bizanslılar yapmıştır. Kütahya Kalesi Antik devirlerden başlayarak üzerinde yerleşimin olduğu sanılan tepede üzerinde bir iç kale, hisar ve Osmanlı devrinde aşağıdaki suyu da içine alacak şekilde eklenen üçüncü bir kısımdan meydana gelmiştir (Şekil 1A). Kale, Selçuklular, Germiyanogulları ve Osmanlılar tarafından da kullanılmıştır. Kale, İç Kale ve Yukarı Kale olmak üzere iki bölümden meydana gelmiş, moloz, kesme taş ve tuğla hatıllarla yapılmıştır. Duvar örgüleri arasında çok sayıda devşirme malzemelere de rastlanmaktadır.



**Şekil-1** [A] Günümüzde kalenin görünümü, [B] Duvar örgülerde tuğlanın kullanım şekilleri, (C) duvar örgülerden detay (Apperance of the castle today, [B] Usage of bricks in the walls (C) Details of walls)

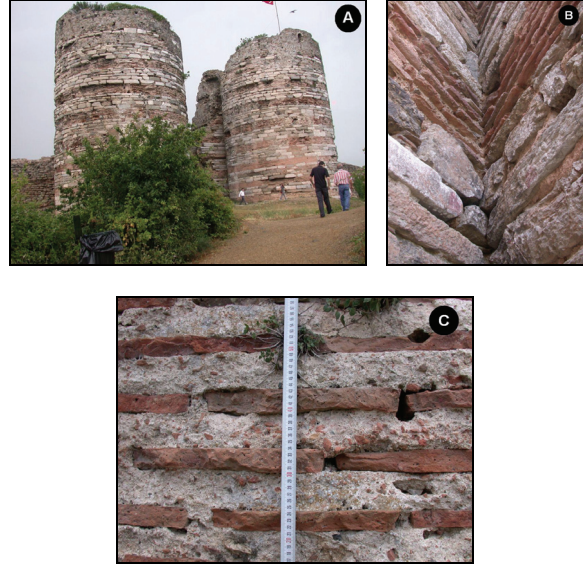
Kalenin burçlarında ve duvarlarında yer alan tuğla örgülerdeki tuğla sıralarının farklı olması, burçların farklı dönemlerde, farklı ustalar tarafından yenilenmesinin bir göstergesi olduğunu düşündürmektedir. Burçlar 5-7 sıra tuğla örgüsü üzerine ve 5-10 sıra çeşitli doğal taşlarla örülerek inşa

edilmiştir (Şekil 1B,1C). Bazı burçlarda 1 ya da 2 sıralı tuğla örgüler de bulunmaktadır ki, bu görünüm tuğlaların düzenli bir kullanım şeklinin olmadığını ya da kaleye yapılan ilave ve onarımlarda farklı tekniklerin uygulandığı göstermektedir. Kalede yaygın olarak kullanılmış olan bu tuğlalar genellikle kare ve dikdörtgen şeklinde olup, kare tuğlaların kenar uzunlukları 23/32 cm arasında, kalınlıkları da 3.5/5.5 cm arasında değişmektedir. Dikdörtgen şekilli tuğlalar ise genellikle kare şekilli tuğlaların yarısı kadardır.

### 1.1.2 Yoros Kalesi (Yoros Castle)

Anadolu Kavağı'nda boğazın Karadeniz 'e açıldığı yerin en tepe noktasında bulunan kale, İstanbul'daki tek Bizans kalesidir. Genellikle Ceneviz Kalesi adıyla bilinen, kaynaklara göre aslında bir Bizans Kalesi olduğu kesin olan Yoros Kalesi, İstanbul boğazına Karadeniz'den girişteki Anadolukavağı'nın boğaza hakim bir tepesi üzerinde 13 ve 14. yüzyıllarda inşa edilmiştir. Yoros Kalesi'nin bu isminin Hieron (kutsal yer) den geldiği söylene de Zeus'un sıfatı olan Ourios (uygun rüzgarlar)'dan alındığı da iddia edilir [1].

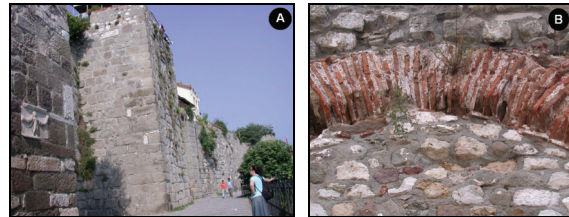
Kale, Bizans'ın gerilemesiyle birlikte bir dönem Ceneviz'lerin, ardından da İstanbul'un fethinden hemen önce 1391 yılında Türklerin hakimiyetine geçmiştir. Türklerin eline geçmesinin ardından Yoros olarak adlandırılan kale, Karadeniz'e hakim bir arazide 500 metre uzunluğa sahip iki tepe üzerine konumlanmaktadır. Kalenin genişliği 60 ile 130 metre arasında değişmektedir. Kalede yaygın bir kullanım yeri bulmuş olan tuğlalar kare ve dikdörtgen şeklinde olup kare tuğlaların kenar uzunlukları 30-37cm, kalınlıkları da 3-4,5cm arasında değişiklikler göstermektedir. Dikdörtgen tuğlaların boyutları ise kare şeklindeki tuğlaların yarısı kadardır. Kalenin en gösterişli yeri çifte kulelerdir [Şekil 2A]. Kuleler 6-7 sıra tuğla örgüsü üzerine ve 3-4 sıra çeşitli kesme taşlarla örülerek inşa edilmiştir [Şekil 2B]. Aynı sistemin kalenin orijinal duvar örgülerinde de uygulandığı izlenmektedir [Şekil 3B]. Burçlarda tuğla örgüler yaklaşık 60-70cm, taş örgü ise 95-110cm yüksekliğine sahiptir. Bu örgü sisteminin bazı burçlarda devam etmemesi, bunların farklı dönemlerde inşa edildiğini ya da onarıldığını göstermektedir. Kalede kullanılan tuğlaların renkleri de çeşitlilik göstermektedir. Kırmızımsı renkte tuğlalar yaygın olmakla birlikte pembemsi ve yer yer deve tüyü sarısı renkte tuğlaların varlığı da dikkati çekmektedir.



**Şekil-2** [A] Günümüzde çifte kulelerin görünümü, [B] İkiz kule örgülerde tuğlanın kullanım şekilleri, (C) Tuğla örgüden detay. ([A] Appearance of twin towers today, [B]Usage of brick in twin tower walls, (C) Detail of brick wall.)

### 1.1.3 Amasra Kalesi (Amasra Castle)

Amasra, küçük yarımadaının üzerinde temelleri antik dönemlere kadar uzanan ve Bizanslılar döneminde yapılmış olan bu kale daha sonra, XIV.-XV.yüzyıllarda Cenevizliler ve Osmanlılar zamanında çeşitli ilavelerle genişletilmiş ve orijinalliğinden uzaklaşmıştır. Günümüzdeki durumuna göre bu kale, 500-600mt uzunluğunda dikdörtgen planlıdır. Kalenin duvarlarına kısa aralıklarla kuleler yapılmış ve böylece daha sağlamlaştırılmıştır. Kara tarafındaki surların önüne hendekler yapılmıştır. Kale üzerindeki yapılan araştırmalarda eski dönemlere ait taşların, mimari parçaların, kitabelerin ve heykel kaidelerinin kullanıldığı görülmüştür [Şekil 3A]. Bunların arasında Roma dönemine ait büyük bir kitabe parçası kalenin yapımı sırasında Bizanslıların önceki döneme ait eserleri tahrip ettiğini göstermektedir [2]. Kalenin sur ve duvarları büyük ölçüde volkanik taş türü olan andezitlerle inşa edilmiştir. Tuğla ise bazı kemerlerde, kulelerde ve yer yer duvar örgülerde, taşların aralarında kullanım yeri bulmuştur [Şekil 3B,C]. Bu tuğlalar genellikle kare şeklindedir. Tuğlaların uzun kenarları yaklaşık 26-36 cm, kalınlıkları ise 4-5 cm. arasında değişmektedir.



**Şekil-3** [A] Günümüzde Amasra kalesi, [B] Tuğla kemer, ([A] Amasra castle today, [B] Brick arch.)

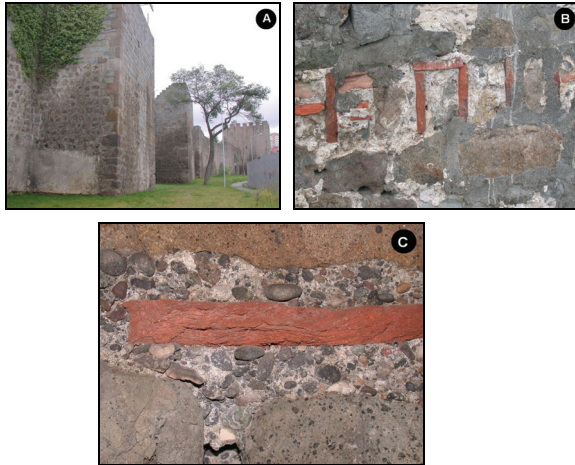




**Şekil-3** [C] Duvar örgüde tuğlanın kullanımı  
([C] Usage of brick in walls)

### 1.1.4 Trabzon Kalesi (Trabzon Castle)

Trabzon il merkezinde, şehrin en yüksek bölgesinde bulunan kale, antik dönemlere ait temeller üzerinde Bizans döneminde yükseltilmiştir. Kalenin ilk temellerinin MÖ 2000'li yıllarda atıldığı sanılmaktadır. Kale, Yukarı Hisar, Orta Hisar ve Aşağı Hisar olmak üzere üç ayrı bölümden meydana gelmiştir.



**Şekil-4** [A] Trabzon kalesinin genel görünümü, [B] Duvar örgülerde tuğlanın kullanım şekilleri, [C] örgüden detay ([A] General appearance of Trabzon Castle, [B] Usage of brick in walls, [C] Detail of wall)

İmparator II. Aleksios 'un (1297-1330) yaptırdığı Orta Hisar, Yukarı Hisar ve İç Kale'nin devamı şeklinde olup, düzenli bir görünüme sahip değildir. İmparator Justinyanus zamanında yaptırılan bölümlerde surlara yuvarlak bir görünüm verilmiştir. Osmanlı hakimiyetine geçtikten sonra Fatih Sultan Mehmet döneminde kale yeniden elden geçirilmiş çeşitli onarım ve ilaveler yapılmıştır. Görüldüğü gibi kale belirli bir dönemin yapısı olmayıp zaman içinde bölgede hüküm sürmüş çeşitli uygarlıkların birer damgasını taşımaktadır. Kale, yaygın olarak moloz ve kesme taşlar kullanılarak inşa edilmiştir [Şekil 4A]. Yukarı hisar bölümündeki bazı duvarlarda yer yer tuğla örgülere de rastlanmaktadır [Şekil 4B,C]. Kalede tuğlanın sürekli ve düzenli bir kullanım yeri yoktur. Bunun yanında kalenin çeşitli yerlerindeki

kemer ve tonozlar tuğla örgülerle inşa edilmiştir. Tuğlalar kare şeklinde olup bir kenarı yaklaşık 28-34 cm, kalınlıkları ise 3,5-5 cm. arasında değişmektedir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada Bizans dönemi Trabzon (TR), Kütahya (KUT), Amasra (AMAS) ve Yoros (YOR) kalelerinde kullanılan tuğla malzemenin fiziko-kimyasal ve mekanik özellikleri incelenmekte, süreç ve koşulların malzemenin performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir.

Eski eser malzemelerinin fiziko-kimyasal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi için henüz özel standartlar bulunmamaktadır. Mevcut standartlar da genellikle çağdaş malzemeler için geliştirilmiştir. Tarihi yapı malzemeleri çoğunlukla bölgelere göre değişen, geleneksel yöntem ve tekniklerle üretildikleri ve çevre koşullarından da çok uzunca bir süredir etkilenmiş oldukları için günümüz malzemelerinde kullanılan standart yöntemler, bu malzemelerin özelliklerini ortaya çıkarmada her zaman yeterli olmamaktadır. Çünkü günümüz standartlarının belirttiği uygun boyut ve özellikte örnekler her zaman elde edilemediği gibi, üretimlerinin üzerinden çok uzun bir zaman geçmiş olması gibi nedenler burada belirleyici bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla çeşitli standartlardan yararlanma gereği ortaya çıkmakta ve yapılan ölçüm teknikleri de malzemenin günümüzdeki durumu hakkında sadece genel bilgiler verebilmektedir. Bu çalışmada da benzer bir yöntem izlenmiş, özelliklerin tespitinde çeşitli standartlardan yararlanma yoluna gidilmiştir.





### 2.1. Örnekler (Samples)

Her kalenin dört farklı yerinden sağlam görünümlü çeşitli tuğla örnekler alınmış ve bunlar kuru yöntemle kesilerek 40\*40\*160mm ( $\pm 3$ mm) boyutlarına getirilmiştir. Her kaleden 12 adet olmak üzere alınan toplam örnek sayısı 84'dür. Tablo 1'de tuğla örneklerin alındığı kaleler ve örneklerle ilgili genel bilgiler topluca gösterilmektedir.

### 2.2. Mekanik deneyler (Mechanical Experiments)

Kalelerin farklı yerlerinden alınan tuğla örnekler, bozulan, kırılan kısımları kesilerek 40x40x160mm ( $\pm 3$ mm) prizma boyutlarına getirilmiştir. Bu örneklerin öncelikle ultrases geçiş süreleri ölçülerek, buradan dinamik elastiklik modülleri tespit edilmiş, sonra tek eksenli yük altında eğilme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Bu deneyden kalan parçalar da basınç ve yarmada çekme deneylerinde kullanılmıştır. Bu temel mekanik testler 6-60 kN kapasiteli AMSLER marka universal preste yapılmış, ultrases hızı ölçümleri ise TS EN 14579 [3] standardından yararlanılarak PUNDIT markalı ölçüm cihazında boylamasına ölçülmüştür (54 kHz).

**Tablo 1.** Tuğla örneklerin alındığı kaleler ve tuğlaların genel özellikleri (General characteristics of bricks and castles where brick samples have been received)

Örnekler	Renk	Genel doku	Boyutlar	Olası dönem	Bölge ve inşa dönemi	Kale
KUT-I KUT-II KUT-III	Sarımsı, turuncu açık/koyu kırmızı	Pürüzlü yüzey, ortası ince, iç bükey, bir yüzeyi girintili çıkıntılı, gözenekli	Kare, a=23/32, b=23/32 c=3,5/5,5	VIII-X XIII- XIV	Kütahya Bizans	
AMAS	Açık kırmızı, koyu turuncu, Kırmızımsı	Düzensiz yüzeyli, sert, az gözenekli	Kare a=26/36, b=26/36,c=4/5,5	IX-XI	Amasra Bizans/ Bizans	
TR-I TR-II	Kırmızımsı Sarımsı, kahve	Bir yüzeyi düzensiz, sert dokulu. Az gözenekli, yüzeyler pürüzlü,	Kare a=28/34 b=28/34,c=3,5/5	X-XII	Trabzon Bizans	
YOR	Koyu kırmızı Deve tüyü sarısı	Bir yüzeyi yarım daire şeklinde desenli, ince dokulu, sert, yer yer gözenekli	Kare a=29/38 b=29/38,c=3/4,5	XIII- XIV	İstanbul Bizans	

Basınç deneylerinde TS EN 772-1 [4] ve yarmada çekme deneylerinde ise TS EN 12390-6 [5] standardı temel alınmıştır.

### 2.3. Fiziksel analizler (Physical Analysis)

Örneklerin temel fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde TS EN 771-1 [6] ve EN 1936 [7] standartlarından yararlanılmış olup, su emme, birim hacim ağırlık ve porozite oranları gibi temel fiziksel özellikler Arşimet metoduna göre tespit edilmiştir. Sonuçlar Tablo-2’de topluca verilmiştir.

### 2.4. Kimyasal deneyler ve XRD analizleri (Chemical Experiments and XRD Analysis)

Tuğlaların kimyasal ve mineralojik kompozisyonunu belirleyebilmek amacıyla tuğlalar üzerinde ICP ve XRD analizleri yapılmıştır. Bu örneklerin kimyasal kompozisyonlarını tespit etmek için 0,200 gr ve 125 mikron elek altı incelikteki örneklerin lityum metaborat-lityum tetraborat ( $\text{LiBO}_2\text{-LiB}_4\text{O}_7$ ) füzyonu ile çözünürleştirilmiş ve İndüktif Eşleşmiş Plazma Emisyon Spektroskopisi (*Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy, ICP-ES*) analizleri yapılmıştır (ACME Analytical Labs.). Bu analizlerle örneklerin genel kimyasal içerikleri metal oksit (%) olarak, içeriklerinde bulunan diğer eser miktardaki maddeler de element (ppm) olarak tespit edilmiştir. Tuğla tozlarının mineralojik kompozisyonu, 90 mikron elek altı örnekler üzerinde yapılan XRD analizleriyle Philips X-Pert Pro X-Ray Diffractometer (XRD) cihazında tespit edilmiştir (İYTE MAM).

### 2.5. Puzolanik aktivite deneyleri (Pozzolanic activity experiments)

Mekanik deneylerden ve kesim sırasında arta kalan tuğla parçaları öğütülerek ASTM C 618-03 [8] standardında öngörülen inceliğe getirilmiş ve bu örnekler üzerinde de ASTM C 593-95 ve TS 25 [9-

10] standartlarından hareketle puzolanik aktivite deneyleri yapılmıştır.

### 3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of Experiment Results)

Tuğla örnekler üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik deneylerin sonuçları Tablo-2’de topluca verilmiş olup özellikler arasındaki ilişkiler ise alt başlıklarda değerlendirilmektedir.

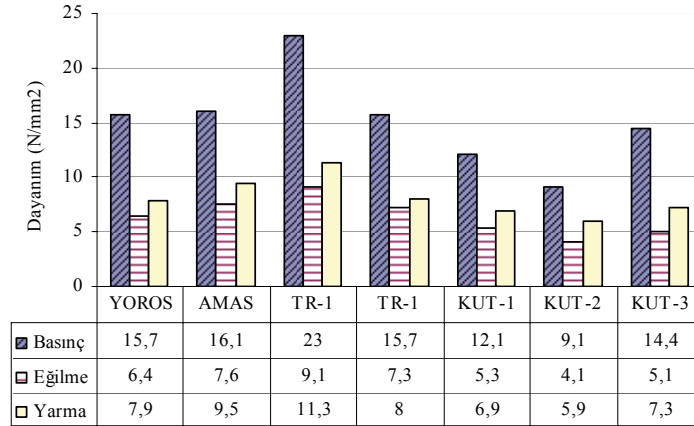
#### 3.1. Tuğlaların mekanik ve fiziksel özellikler açısından değerlendirilmesi

(Evaluation of Bricks in terms of mechanical and physical characteristics)

Örnekler üzerinde yapılan basınç, eğilme ve yarmada çekme deneylerinden elde edilen ortalama değerler karşılaştırılmalı olarak Şekil-5’de gösterilmektedir. Mukavemet özellikleri açısından Trabzon kalesinde yer alan tuğlalarının yüksek değerler aldığı görülmektedir. Bu tuğlaların TR-I örneğinde basınç dayanımı ortalaması  $23,0 \text{ N/mm}^2$ , eğilme dayanımı  $9,1 \text{ N/mm}^2$  ve yarma dayanımı da  $11,3 \text{ N/mm}^2$  olarak elde edilmiştir. Yoros Kalesi ve Amasra Kalesi tuğlalarının mekanik özellikleri ise birbirine yakın değerler taşımaktadır. Bu iki kaledeki tuğlaların gerek fiziksel gerek mekanik açıdan birbirine yakın özelliklere sahip olmaları, benzer teknolojilerle üretildiklerini ifade edebilir. Kütahya Kalesinde ise mekanik özelliklerin nispeten daha düşük değerler aldığı belirlenmiştir. Trabzon ve Kütahya kalelerinin diğer örneklerinde tespit edilen mukavemet özelliklerinde farklılıklar, kullanılan yerel hammadde kaynaklarının ve dönemsel üretim tekniklerinin farklılığına işaret edebildiği gibi, pişirme işlemi sırasında aynı fırının değişik yerlerinde bulunan tuğlaların farklı ısıl işleme maruz kalmaları da mekanik özellikleri üzerinde etkili olabilmektedir. Geleneksel harman tuğla üretiminde bu durumla sıklıkla karşılaşmaktadır.

**Tablo 2.** Deneilerde elde edilen sonuçlar (Results obtained from experiments)

Örnekler	Birim ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Ultras ses hızı (km/s)	E- Mood (kN/mm <sup>2</sup> )	Basınç dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Eğilme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Yarma dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Gerçek yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Ağırlıkça su emme (%)	Görünen porozite (%)
<b>YOR</b>									
Y1	1.83	3.13	18.3	19.6	6.5	7.8	2.58	15.7	28.9
Y1	1.73	3.02	16.3	13.3	7.8	8.5	2.58	19.0	32.8
Y3	1.61	2.52	10.5	9.4	5.2	6.5	2.52	22.5	36.1
Y4	1.81	3.08	17.6	20.6	6.0	8.6	2.56	16.3	29.4
<b>Ort.</b>	<b>1.75</b>	<b>2.94</b>	<b>15.7</b>	<b>15.7</b>	<b>6.4</b>	<b>7.9</b>	<b>2.56</b>	<b>18.4</b>	<b>31.8</b>
<b>AMAS</b>									
A1	1.81	3.23	19.2	15.6	8.9	11.0	2.57	16.6	29.8
A2	1.78	3.11	17.5	15.1	7.0	8.8	2.61	19.3	33.5
A3	1.77	3.00	15.8	15.7	7.3	8.9	2.51	17.5	30.6
A4	1.76	3.19	18.1	18.0	7.3	9.4	2.58	19.6	33.5
<b>Ort.</b>	<b>1.78</b>	<b>3.13</b>	<b>17.6</b>	<b>16.1</b>	<b>7.6</b>	<b>9.5</b>	<b>2.57</b>	<b>18.2</b>	<b>31.8</b>
<b>TR-I</b>									
T1	1.91	3.39	22.4	19.0	8.3	9.1	2.39	10.5	20.1
T2	1.92	3.41	22.8	17.1	8.0	8.6	2.42	10.7	20.6
T3	1.99	3.54	26.2	23.1	7.4	9.0	2.61	12.1	23.9
T4	2.05	3.74	30.4	33.0	12.9	18.5	2.68	11.6	23.6
<b>Ort.</b>	<b>1.97</b>	<b>3.52</b>	<b>25.4</b>	<b>23.0</b>	<b>9.1</b>	<b>11.3</b>	<b>2.52</b>	<b>11.2</b>	<b>22.0</b>
<b>TR-II</b>									
TR1	1.67	2.57	11.2	17.2	7.1	7.4	2.55	20.5	34.3
TR2	1.67	2.50	10.6	16.4	6.4	7.3	2.54	20.5	34.2
TR3	1.84	3.15	18.8	18.6	8.3	9.5	2.56	15.5	28.2
TR4	1.72	2.87	14.7	10.6	7.3	7.8	2.46	17.4	30.0
<b>Ort.</b>	<b>1.73</b>	<b>2.77</b>	<b>13.8</b>	<b>15.7</b>	<b>7.3</b>	<b>8.0</b>	<b>2.53</b>	<b>18.5</b>	<b>31.7</b>
<b>KUT-I</b>									
KUT1	1.42	2.80	11.4	12.9	6.6	8.1	2.49	30.5	43.1
KUT2	1.39	2.80	11.2	14.8	6.8	8.3	2.48	31.8	44.1
KUT3	1.44	2.60	10.2	9.7	3.1	5.0	2.52	29.9	42.9
KUT4	1.35	2.60	9.4	11.0	4.6	6.0	2.55	34.8	47.0
<b>Ort.</b>	<b>1.40</b>	<b>2.70</b>	<b>10.6</b>	<b>12.1</b>	<b>5.3</b>	<b>6.9</b>	<b>2.51</b>	<b>31.7</b>	<b>44.3</b>
<b>KUT-II</b>									
KUT5	1.33	2.40	8.0	11.4	3.6	5.1	2.44	34.2	45.5
KUT6	1.38	2.50	8.8	8.2	4.1	6.1	2.43	31.3	43.3
KUT7	1.35	2.70	9.9	8.7	4.0	5.4	2.46	33.7	45.4
KUT8	1.34	2.50	8.7	7.9	5.0	7.0	2.55	35.3	47.4
<b>Ort.</b>	<b>1.35</b>	<b>2.53</b>	<b>8.9</b>	<b>9.1</b>	<b>4.1</b>	<b>5.9</b>	<b>2.47</b>	<b>33.7</b>	<b>45.4</b>
<b>KUT-III</b>									
KUT9	1.48	2.80	11.6	13.3	6.7	7.9	2.52	27.8	41.2
KUT10	1.58	2.70	12.1	15.2	4.1	6.5	2.35	20.6	32.7
KUT11	1.60	2.90	13.5	11.5	4.0	7.1	2.35	20.0	32.0
KUT12	1.41	2.70	10.5	17.4	5.4	7.6	2.29	27.6	38.7
<b>Ort.</b>	<b>1.52</b>	<b>2.78</b>	<b>11.9</b>	<b>14.4</b>	<b>5.1</b>	<b>7.3</b>	<b>2.38</b>	<b>24.0</b>	<b>36.1</b>

**Şekil 5.** Tuğlaların mekanik özellikleri (Mechanical properties of bricks)

Tarih yapılarında kullanılan tuğlaların çeşitli özellikleri bazı araştırmalara da konu olmuştur. Örneğin Radivojević (2005) [11] çalışmasında IV ve VI yüzyıl tuğlalarının (Serbia) Elastik modülünü 12,4 ile 5,9 kN/mm<sup>2</sup>, basınç gerilmesini 18,5 ile 10,0 N/mm<sup>2</sup> ve eğilme gerilmesini de 7,6 ile 2,9 N/mm<sup>2</sup> olarak tesbit etmiştir. Özkaya [12], Roma dönemi tuğlalarının basınç dayanımını 5,5 - 6,1 N/mm<sup>2</sup> arasında, Lopez-Arce vd. [13] ise İspanya'daki Roma dönemi

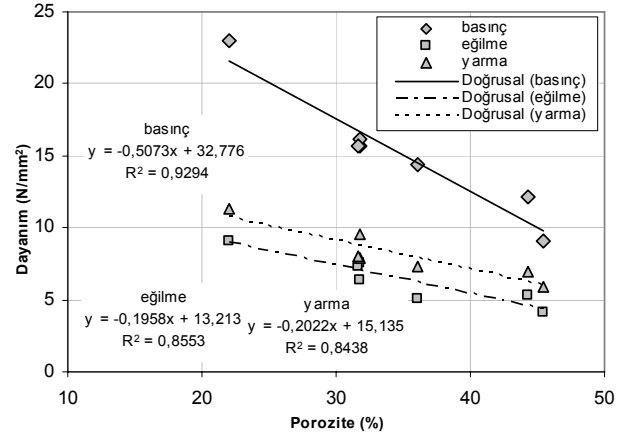
tuğlalarının basınç gerilmelerini 21,1- 44,0, N/mm<sup>2</sup> olarak belirlemişlerdir ki, bu değerler bu tuğlaların (3-4. yy) üstün mekanik özelliklere sahip olduklarını göstermektedir. İstanbul Karasurlarında yer alan Bizans dönemi harman tuğlalarının basınç gerilmeleri 10,1 N/mm<sup>2</sup>, eğilme gerilmeleri ise 4,95 N/mm<sup>2</sup> olarak bir başka deneysel çalışmada tesbit edilmiştir [14].

Fiziksel özellikler açısından değerlendirildiğinde ise Trabzon Kalesi tuğları genellikle düşük poroziteye (TR-I, ort. % 22 ağırlıkça) ve su emme oranlarına (ort. %11,2) sahip oldukları tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlığı da diğer grup tuğlara göre en fazladır (1,97 kg/dm<sup>3</sup>). Kütahya kalesi tuğları ise daha gözenekli bir yapıda olup düşük birim hacim ağırlıklarına (1,35-1,52 kg/dm<sup>3</sup>) fazla su emme oranlarına sahiptirler (ort. % 33,7) ve poroziteleri de (ort. %45) yüksek değerler almaktadır. Genel olarak porozitesi ve ağırlıkça su emme oranları nispeten fazla olan örneklerin mekanik özellikleri de daha düşük değerlere sahiptirler. Yoros ve Amasra Kalesi tuğlarının fiziksel özellikleri ise nispeten birbirine benzemektedir ve geçen süre içinde mekanik özelliklerini korudukları söylenebilir.

Bazı çalışmalarda tuğların fiziksel özellikleri de incelenmiştir. XIII-XIV yy'da inşa edilmiş olan Osmanlı dönemi Anadolu Hisarı tuğlarının yoğunlukları 1,66 g/cm<sup>3</sup>, poroziteleri % 32, su emme oranları ise % 19,5 şeklinde, diğer bir çalışmada da [15] XIV-XV.yy dönemi Osmanlı tuğlarının yoğunlukları 1,7-1,8 g/cm<sup>3</sup> ve porozite oranları ise % 33-37 arasında elde edilmiştir. Bir başka çalışmada ise Serbia arkeolojik bölgesindeki (Belgrad) IV. ve VI. yüzyıla ait tuğlarının porozite oranları % 19,4 ve 18,1, birim hacim ağırlıkları ise 1,78 ile 1,3 g/cm<sup>3</sup> şeklinde saptanmıştır [11]. İspanya'nın Toledo şehrindeki çeşitli dönemlere ait (X-XIX yy.) bazı tarihi tuğlarının özellikleri üzerinde yapılan bir diğer çalışmada da [13] tuğların su emme oranları % 19-22 yoğunlukları 1,6-1,5 g/cm<sup>3</sup>, toplam porozite oranları ise % 32,5-43 şeklinde elde edilmiştir. Fiziksel deneylerden elde edilen veriler, literatürde belirtilen çalışmalardaki sonuçlardan çok da farklı değerler taşımamaktadır. Dolayısıyla, bölgesel hammadde kaynaklarının farklılığı, şekillendirilmenin homojen olarak yapılamaması ve ampirik pişirme teknikleri gibi çeşitli parametreler tarihi tuğların bire bir örneklerinde standart değerlerin elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte genel ortalama değerler tuğların özellikleri hakkında yine de genel bilgiler verebilmektedir.

Tüm tuğların mekanik özellikleri ile temel fiziksel özelliklerden olan porozite arasındaki ilişkiler doğrusal regresyonla araştırılarak aralarındaki korelasyon değerlendirilmiştir (Şekil-6). Tuğların porozite oranları ile basınç dayanımları arasındaki korelasyon  $r^2 = 0,929$ , porozite ile eğilme dayanımları arasındaki korelasyon  $r^2 = 0,855$  ve porozite ile yarmada çekme dayanımları arasındaki korelasyon katsayısı da  $r^2 = 0,843$  şeklinde değerler almaktadır. Katsayılarıdaki küçük sapmalar örneklerin heterojen bir iç yapı özelliği göstermeleri ve farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması nedeniyle olağan karşılanabilir. Bununla birlikte yine de, belirli bir güvenilirlikle, tuğların fiziksel özellikleri ile mekanik davranışları doğrusal ilişkilerin bulunduğu söylenebilir. Özellikle tuğların basınç dayanımları

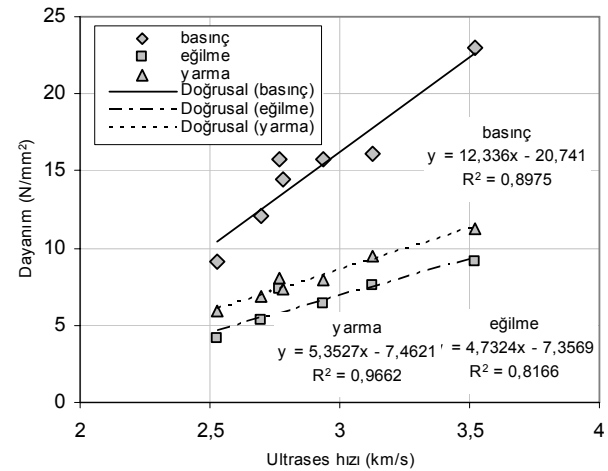
ile porozite oranları arasındaki korelasyonun daha yüksek bir değer aldığı görülmektedir.



Şekil 6. Tüm tuğla örneklerin porozite oranları ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler (Relations between porosity rates and mechanical properties of all brick samples)

### 3.2 Tuğların ultrases hızları ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler (Relation between ultrasound speeds and mechanical characteristics of bricks)

Mekanik deneyler öncesinde tuğların ultrases geçiş süreleri ölçülerek, buradan ultrases hızları ile dinamik elastik modülleri belirlenmiştir. Tüm örneklerin ultrases hızları ortalamaları 2,53 ile 3,52 km/sn arasında değişmektedir. Tablo-2'de görülebileceği gibi ultrases hızları yüksek olan örneklerin mekanik dayanımları da yüksek olup fiziksel özellikler bakımından da daha düşük porozite ve su emme oranlarına sahiptirler. Mekanik özelliklerinde olduğu gibi ultrases hızları da en yüksek olan grup Trabzon TR-I örneğidir (ort. 3,52 km/sn). Amasra kalesi tuğlarının ultrases hızları ise ortalama 3,13 km/sn şeklinde yüksek değere sahiptir. Ultrases hızları diğer örneklerle göre düşük olan grup ise Kütahya kalesi tuğlarıdır (ort. 2,7-2,5 km/sn).

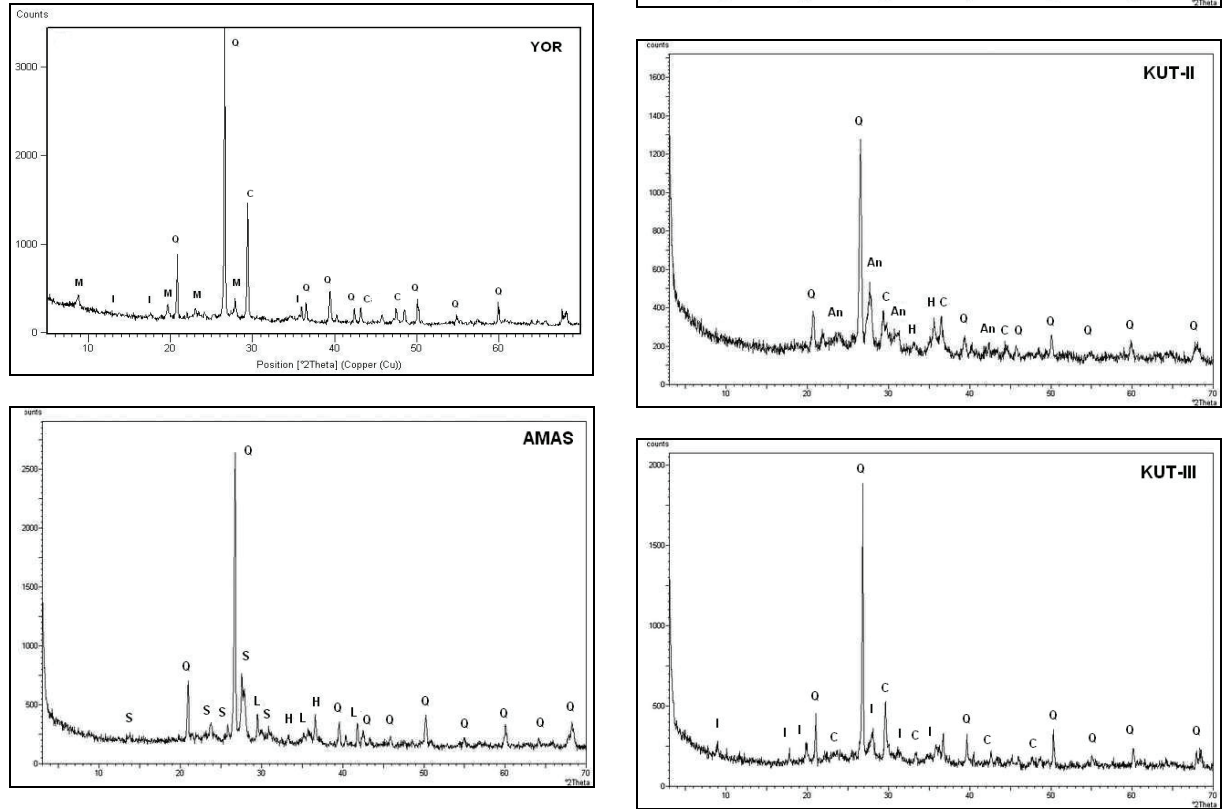


Şekil 7. Tüm tuğla örneklerin ultrases hızları ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler (Relation between ultrasound pulse velocity and mechanical properties of all brick samples)

Tüm örneklerin tespit edilen mekanik değerleri ile ultrases hızları arasındaki ilişkiler de doğrusal regresyonla değerlendirilmiştir (Şekil-7). Tüm tuğlaların basınç dayanımı ile ultrases hızı değerleri arasındaki korelasyon katsayısı  $r^2=0,897$ , ultrases hızı değerleri ile eğilme dayanımları arasındaki korelasyon  $r^2=0,966$  şeklinde yüksek bir değer alırken yarımada çekme dayanımı ile ultrases hızı arasındaki korelasyon da  $r^2=0,816$  olarak nispeten biraz düşük elde edilmiştir. Bununla birlikte elde edilen yüksek korelasyon katsayıları tuğlaların mekanik özellikleri ile ultrases hızları arasında lineer bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu durum tarihi tuğlaların yaklaşık mekanik ve fiziksel özelliklerini kestirebilmek için tahribatsız ultrases hızı yönteminin belirli bir güvenle kullanılabileceğini ve bu özellikleri hakkında bilgiler verebileceğini ifade etmektedir.

### 3.3 XRD analizlerinin değerlendirilmesi (Evaluation of XRD analysis)

Örneklerin X ışını difraksiyonları Şekil-9'da, mineralojik kompozisyonları da Tablo-5'de gösterilmiştir.



Şekil-9 Tuğla örneklerin XRD paternleri. (Q: Kuars, A: albit, An: anortit, H: hematit, L: labradorit, M: Muskovit, P: Piroksen, S: Sanidin, I: İllit, C: Kalsit, So: Sodyum silikat) (XRD patterns of brick samples (Q: Quartz, A: albite, An: anorthite, H: hematite, L: labradorite, M: Muscovite, P: Pyroxene, S: Sanidine, I: Illite, C: Calcite, So: Sodium silicate))



XRD sonuçlarına göre tüm tuğlar *kuvars* ve çeşitli feldispatlar içermektedir (Tablo-5). Bazı mineraller tuğların muhtemel kalsinasyon sıcaklıkları hakkında bilgiler verebilir. Bilindiği gibi feldispatların sıcaklıklara göre çeşitli modifikasyonları bulunmaktadır [16] ve yüksek sıcaklıklarda eriyerek bir nevi çimento görevini görürler. Örneğin *muskovit* ( $KAl_3Si_3O_{11}$ ) minerali 800-900°C'lerde [17], *illit* ( $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ ) (YOR, KUT-III) 800-850°C'lerden sonra [18-19-20-21] ve *hematit* ise (AMAS, KUT-I, KUT-II) 900-950°C'lerden sonra faz değiştirmeye başladığından, tuğların belirtilen sıcaklıklardan daha düşük derecelerde kalsine edildiklerine işaret etmektedir. Ayrıca kalsit pikleri de bu konuda bilgiler verebilmektedir. Çünkü kalsitin dekarbonizasyonu <800°C civarında başlamakta [22] ve strüktürel organizasyonunun 930°C civarında tamamlanmaktadır [23]. Dolayısıyla Kütahya ve Yoros Kalesi tuğla örneklerinde tespit kalsit pikleri bunların düşük sıcaklıklarda pişirildiklerinin bir başka göstergesi olarak kabul edilebilir (Şekil-9).

Örneklerin hiçbirinde *spinel*, *mullit* ve *kristobalit* gibi kararlı minerallerin tespit edilmemesi tüm tuğların pişirilme sıcaklıklarının 950°C üzerine çıkmadığını ve daha düşük sıcaklıklarda pişirildiklerini kanıtlamaktadır.

### 3.4. Kimyasal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi (Evaluation of chemical analysis results)

Yapılan ICP analizleri sonucunda tüm örneklerin genel kimyasal yapıları oksit (%) olarak, içeriklerinde bulunan diğer eser miktardaki maddeler de iz element (ppm) olarak tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo-3 ve Tablo-4'de gösterilmiştir.

Analiz sonuçlarında bir örnek dışında (KUT-III) tüm örneklerin  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  ve  $Fe_2O_3$  oksit bileşiklerinin toplam oranları % 70'den fazladır. KUT-III örneğinde ise bu oran % 69,97 şeklinde bir değere sahiptir. Yoros, Kütahya ve Trabzon Kalesi tuğları (TR-I) CaO oranı bakımından daha zengin görünmektedir. Aynı durum MgO oranı içinde söz konusudur. Bu durum tuğla üretiminde kullanılan hammaddenin kalkerli bir özellik taşıdığını göstermektedir. Aynı zamanda bu örneklerde kızdırma kaybı değerleri de yüksektir. CaO ve MgO oranları yüksek olan Yoros ve Kütahya kalesi tuğlarının kızdırma kaybı oranları diğerlerine göre nispeten daha fazladır. Amasra Kalesi tuğlarında ise bu bileşiklerin daha az olduğu görülmektedir. Tüm örneklerin  $Fe_2O_3$  oranları yüksek olup  $Al_2O_3$  oranları da % 12,5 ile 19,3 arasında değişmektedir. Bu durum, tuğla üretiminde kullanılan

**Tablo-3** Tuğların kimyasal kompozisyonu, kızdırma kaybı ve toplamdaki [C] ve [S] oranları (Chemical composition of bricks, loss of ignition and total [C] and [S] rates)

Örnekler	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	KK	TOP	TOP/C	TOP/S	δ
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	g/cn
YOR	53,45	12,54	6,68	4,65	8,46	1,07	2,25	0,72	0,19	0,12	0,061	9,0	99,95	0,98	<0,02	2,5:
AMAS	62,44	15,16	5,62	1,24	3,75	1,98	3,63	0,79	0,12	0,06	0,009	5,0	99,97	0,6	0,09	2,6:
TR-I	60,24	13,11	6,48	2,42	9,15	0,78	1,26	0,92	0,32	0,1	0,032	4,9	99,92	0,52	0,03	2,5:
TR-II	56,67	13,33	7,98	3,34	6,96	1,27	1,31	0,96	0,48	0,11	0,059	7,2	99,9	0,46	0,11	2,4:
KUT-I	49,07	19,26	6,39	4,15	7,79	0,62	3,56	0,83	0,13	0,1	0,021	7,8	99,89	0,98	0,03	2,5:
KUT-II	50,36	16,82	5,79	4,65	9,66	0,81	3,54	0,74	0,15	0,09	0,017	7,1	99,90	0,93	0,18	2,4:
KUT-III	49,36	15,27	5,34	5,58	8,95	0,69	3,18	0,67	0,14	0,08	0,014	10,5	99,88	1,46	0,04	2,3:

**Tablo 4.** Tuğların iz element içerikleri (Trace element contents of bricks)

Örnekler	Cu	Ba	Zn	Ni	Co	Sr	Zr	Ce	Y
	Ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm	Ppm	Ppm	Ppm
YOR	20	793	106	94	<20	182	413	78	55
AMAS	378	436	158	124	<20	211	184	65	27
TR-I	209	582	107	45	<20	440	200	80	25
TR-II	159	680	101	62	<20	479	177	72	24
KUT-I	63	648	203	111	<20	186	181	85	29
KUT-II	87	612	198	79	<20	176	179	74	29
KUT-III	55	546	151	71	<20	173	171	68	27

**Tablo-5** Örneklerin XRD analiziyle tespit edilen mineralojik kompozisyonu (Mineralogical composition of samples obtained via XRD analysis)

Örnekler	Q	A	An	P	H	L	M	S	I	C	So
YOR	+++	-	-	-	-	++	++	-	+	++	-
AMAS	+++	-	-	-	+	++	-	++/+	-	-	-
TR-II	+++	-	-	+++/+	-	-	-	-	-	-	++
KUT-I	+++	++/+	-	-	++/+	-	-	-	-	++	-
KUT-II	+++	-	++	-	±	-	-	-	-	++/+	-
KUT-III	+++	-	-	-	-	-	-	-	++	++	-

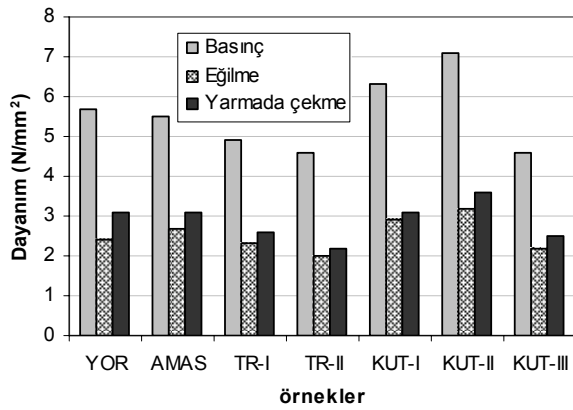
+++ = fazla, ++ = mevcut, + = az miktarda, ± = çok az miktarda, - = yok

(Q: Kuars, A: albit, An: anortit, P: Piroksen, H: hematit, L: labradorit, M: Muskovit, S: Sanidin, I: İllit, C: Kalsit, So: Sodyum silikat)

hammadenin kaolinit bir yapıda olmadığını göstermektedir. Çünkü, kaolin tipi mineraller genellikle montmorillonit, illit ve klorit tipi minerallerden  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı ile ayrılırlar. Bu oran iyi kaolin veya kaolinit killerde takriben 2/1 olup, diğerlerinde ise 3/1 kadardır [24]. Tüm örneklerde ise bu oranlar 2/1 den fazladır. Görüldüğü gibi tuğlaların kimyasal kompozisyonu tuğla üretiminde kullanılan bölgesel hammadde kaynaklarının özelliği hakkında da bilgiler bazı verebilmektedir. Ayrıca tuğlaların kırmızımsı/ renkliliği demir bileşiklerinin ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

### 3.5. Tuğlaların puzolanik özellikleri (Pozzolan characteristics of bricks)

Yoros, Amasra ve Kütahya kalelerinin pembemsi renkteki kireç bağlayıcı harçlarında tuğla kırık ve tozlarının kullanılmış olması ve bunların harca puzolanik katkı olarak katıldıkları düşünülmüş, tuğlaların puzolanik karakteristikleri de araştırılmıştır. Bu çalışma aynı zamanda tuğlaların kalsinasyon özellikleri hakkında da bilgi verebilmektedir. Bunun için her gurubun örnekleri öğütülerek ASTM C 618-03 standardında öngörülen inceliğe getirildikten sonra bu malzemelerle kireç harçları üretilip TS 25 ve ASTM C 593-95 standardına göre puzolanik aktivite deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucu tüm örneklerin çeşitli oranlarda puzolanik özellik taşıdıkları tespit edilmiştir. Aktivite için standartta öngörülen minimum basınç dayanımı  $4,0 \text{ N/mm}^2$  olarak belirtilmiş olup tüm örnekler bu koşulu sağlamaktadırlar [Şekil-8].



**Şekil-8** Tuğla tozları ile üretilmiş kireç harçları üzerinde yapılan puzolanik aktivite deneyinde elde edilen mekanik değerler (Mechanical values of pozzolan activity experiment applied by lime mortars produced from brick dusts)

Tuğlaların puzolanik özellik taşımaları, kimyasal ve mineralojik yapıların yanında kalsinasyon sıcaklıklarıyla da ilgilidir, dolayısıyla puzolanik özelliğe sahip olmaları tuğlaların  $850-900^\circ\text{C}$ 'den yüksek bir sıcaklıklara maruz kalmadıklarını da

göstermektedir. Bu durum puzolanik aktivite için uygun sayılabilecek bir kalsinasyon aralığı sayılabilir. Çünkü, killerin kalsinasyon sıcaklıkları  $900-950^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde olduğunda, *mullit*, *kristobalit* vb. kararlı mineraller oluşmaya başlamakta ve buna bağlı olarak puzolanik özellikleri azalmaktadır [15-25]. Bu veriler doğrultusunda tuğlaların üretimindeki kalsinasyon sıcaklıklarında nisbi farklılıklar olmakla birlikte genellikle birbirlerine yakın sıcaklıklarda pişirildikleri söylenebilir. Kalsinasyon yanında üretimlerinde kullanılan hammadde kaynaklarının farklı mineralojik ve kimyasal yapıda olmaları da farklı puzolanik özellik kazanmalarına neden olabilir. Örneğin kaolenli killer daha iyi bir puzolanik özellik gösterebilmekte [26] ve kaolenin pişirilmesi ile elde edilen puzolanik aktivitenin, montmorillonit ve illit tipi killerden daha fazla olduğu literatürde de ifade edilmektedir [27].

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bizans tuğlaları üzerinde yapılmış bu deneysel çalışmadan elde edilen veriler çeşitli bölgelerdeki tarihi kale tuğlalarının zamanın yıpratıcı etkilerine karşı özgünlüğünü büyük ölçüde korumaları ve yer yer üstün mekanik özelliklere sahip olmaları, bunların uygun tekniklerle üretildiklerini ifade etmektedir. Bu tuğlalar, geçen uzun süreç içinde etkisi altında kaldıkları çeşitli atmosferik ve fiziko-kimyasal etkilere rağmen özgün durumlarını günümüze kadar koruyabilmişlerdir.

XRD analizleriyle tespit edilen mineraller tuğlaların düşük sıcaklıklarda pişirildiklerini göstermektedir. Diğer yandan tuğlaların puzolanik özelliklere sahip olmaları da bunu desteklemektedir. Yoros, Amasra ve Kütahya Kalelerinin harçlarında agrega olarak tuğla kırık ve tozlarının da kullanılmış olması, puzolanik karakterdeki bu tuğlaların harçlara katkı olarak katıldığı düşündürmektedir. Bunun için harç analizlerine de ihtiyaç bulunmaktadır.

Aynı Kalelerin farklı yerlerinden alınan örneklerin farklı fiziksel ve mekanik değerler taşıması, bu tuğlaların geleneksel ve amprik yöntemler üretilmesinin bir sonucu olarak kendisini gösterebileceği gibi dönemsel üretim teknolojilerinin farklılığına da işaret edebilir. Ayrıca Kale gibi savunma amaçlı yapılan büyük yapıların inşaa süreçleri dönemlerinin gereklerine göre hızlı bir çalışmayı gerektirebileceğinden bu durum malzeme üretim ve inşaa teknolojilerine de yansıyor her yerde aynı kaliteye sahip malzemenin bulunabilmesini de zorlaştırmaktadır. Bu kalelerin sağlam tuğlalarının yanında diğer bazı tuğlalarında görülen mekanik ve kimyasal ayrışmalar bu sürecin bir sonucu olarak da değerlendirilebilir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. Eyice, S. **Bizans Devrinde Boğaziçi**, İÜ, Edebiyat Fak. Yay., No:2236. İstanbul, 1976.
2. Sakaoglu, N. **Çeşm-i Cihan AMASRA**. Kültür Bakanlığı Tarih Vakfı Yay., İstanbul, 1999.
3. Türk Standardı TS EN 14579, **Doğal Taşlar-Deney Metotları-Ses Hızı İlerlemesinin Tayini**. Türk Standardları Enstitüsü, Şubat 2006, Ankara.
4. Türk Standardı TS EN 772-1 **Kagir Birimler-Deney Metotları- Bölüm 1: Basınç Dayanımının Tayini**. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Nisan 2002.
5. Türk Standardı TS EN 12390-6 **Betonda Yarma Çekme Dayanımı Saptama Deneyi**. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Nisan 2002.
6. Türk Standardı TS EN 771-1 **Kagir Birimler – Özellikler- Bölüm 1: Kil Kagir Birimler (Tuğlalar)**. Türk Standardları Enstitüsü, Nisan 2005, Ankara.
7. EN 1936, **European Standard Naturel Stone Test Methods. Determination of Real Density and Apparent Density, and of total and open Porosity**. Brussels, December 2006.
8. ASTM C 618-03 **Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**.
9. Türk Standardı TS 25, **Doğal Puzolan (TRAS) – Çimento ve Betonda Kullanılan – Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri**, Ankara, Aralık 2008.
10. ASTM C 593-95 **Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime**, Reapproved 2000.
11. Radivojevic, A. **Investigation of late Antique Bricks from Archaeological Sites of Contemporary Serbia as a Basis of Conservation Works**. Facta Universitatis, *Architecture and civil Engineering*, **3**, No:2, pp. 185-193, 2005.
12. Özkaya, A.Ö. **Properties of Roman Bricks and Mortars Used in Serapis Temple in Bergama**. Master of Science in Architectural Restoration, A Thesis submitted to the Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology., İzmir, 2005.
13. Lopez-Arce, P., Garcia-Guinea, J., Garcia, M., Obis, J. **Bricks in historical buildings of Toledo City: characterisation and restoration**. *Materials Characterization*, **50**, 59-68, 2003.
14. Özgen, S. **Bizans Tuğlaları Üzerine Bir İnceleme**. Mimar Sinan Üniv. MYO, Restorasyon Bölümü, Yayınlanmamış teknik rapor, İstanbul, 1994
15. Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B. Uğurlu, E. **Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters**. *Cement and Concrete Research*, **36**, 1115-1122. 2006
16. Wild, S., Khatib, J.M., O'Farrell, M. **Sulphate resistance of mortar containing ground brick calcined at different temperatures**. *Cement and Concrete Research* **27** (5), 697-709.1997.
17. C.J. McConville, E.W. Lee. **Micro-structural development on firing illite and smectite clay compared with that in kaolinite**. *J.Am.Ceram Soc.* **88**, 2267-2277. 2005.
18. Lopez-Arce, P., Garcia-Guinea, J. **Weathering traces in ancient bricks from historic buildings**. *Building and Environment*, **40**, 929-941. 2005.
19. Maritan, L., Nodari, L., Mazzoli, C., Milano, A., Russo. Maritan. **Influence of firing conditions on ceramic products: Experimental study on clay rich in organic matter**. *Applied Clay Science* **31**, 1-15, 2006.
20. Trindate, M.J., Dias, M.I., Coroado, J., Rocha, F. **Mineralogical transformations of calcareous rich clays with firing: A comparative study between calcite and dolomite rich clays from Algarve, Portugal**. *Applied Clay Science* **42** (2009) 345-355. 2009.
21. Aardt, J.H.P.; Visser, S. **Calcium Hydroxide Attack on Feldspars and Clays: Possible Relevance to Cement-Aggregate Reactions**, *Cement and Concrete Research*, **7**, s.643-648, 1997.
22. Mitchell, R.S., Hart, S.C. **Heated mineral mixture related to ancient ceramic pabteb: X-Ray diffraction study**. In: Allen R.O, editor, *Archeological chemistry Iv*. Washington, DC: American Chemical Society, 145-55. 1989.
23. Lopez-Arce, P., Garcia-Guinea, J. **Weathering traces in ancient bricks from historic buildings**. *Building and Environment* **40**, 929-941.2000.
24. Akıncı, Ö. **Seramik Killeri ve Jeolojisi**. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi*, s.64, Ankara.
25. Lee, S.; Youn, J.K.; Moon, H.S.; “**Phase Transformation Sequence from Kaolinite to Mullite Investigated by an Energy-Filtering Transmission Electron Microscope**”, *Journal of American Ceramic Society*, **82**, (10) 5, s.2841-2848, 1999.
26. Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B. (2006). **Investigation of the Pozzolanic Properties of Bricks Used in Horasan Mortars and Plasters in Historic Buildings**. *Cement and Concrete*, **36**, 1115-1122
27. Ambrose, J.; Murat, M.; Pera, J.; **Hydration Reaction and Hardening of Calcined Clays and Related Minerals**. V. Extension of the Research and General Conclusions, *Cement and Concrete Research*, **15**, s.261-268, 1985.

