



Anadolu'da Roma dönemi yapı tuğlalarının özellikleri

Elif Uğurlu Sağın*

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mimarlık Fakültesi, Mimari Restorasyon Bölümü, Urla, İzmir, 35430, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Kızıl Avlu, Aigai ve Nysa'da kullanılmış yapı tuğlalarının karakterizasyonu
- Tarihi tuğlaların üretim teknolojilerinin belirlenmesi
- Roma dönemi tuğlalarının hammadde kaynakları

Makale Bilgileri

Geliş: 05.01.2016
Kabul: 26.03.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.300612

Anahtar Kelimeler:

Tarihi tuğla teknolojisi,
bileşim özellikleri,
mikroyapı,
kızıl avlu,
aigai,
nysa

ÖZET

Bu çalışmada, Bergama'da bulunan Kızıl Avlu (*Serapeum*) ile Aigai ve Nysa antik kentlerinde bulunan farklı yapılardan alınan Roma dönemi yapı tuğlalarının kimyasal ve mineralojik kompozisyonları, fiziksel, mikroyapısal ve puzolanik özellikleri XRF, XRD, FTIR, SEM-EDS ve kimyasal analizler ile belirlenmiştir. Tuğlaların kimyasal kompozisyonlarını oluşturan temel oksitler ve eser elementler istatistik yöntemler kullanılarak tuğlaların üretiminde kullanılan hammadde kaynaklarının aynı olup olmadığını belirlemeye yönelik olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Roma dönemi yapı tuğlalarının kalsiyumca zengin kil kaynakları kullanılarak ve düşük sıcaklıklarda (<900°C) pişirilerek üretilmiş olduklarını göstermiştir. Tuğla örnekler temel olarak kuvars, albit, anortit, muskovit ve hematit minerallerinden oluşmuştur. Fakat antik kentlerden toplanan bu tuğla örneklerin kimyasal kompozisyonlarının istatistik olarak anlamlı farklılık taşıyor olması tuğlaların üretiminde yerel hammadde kaynaklarının kullanıldığını ortaya koymuştur.

Characteristics of Roman period building bricks in Anatolia

H I G H L I G H T S

- Characterization of building bricks used in Kızıl Avlu, Aigai and Nysa
- Determination of manufacturing technologies of historic bricks
- Raw material sources of Roman period bricks

Article Info

Received: 05.01.2016
Accepted: 26.03.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.300612

Keywords:

Ancient
brick technology,
compositional properties,
microstructure,
kızıl avlu,
aigai,
nysa

ABSTRACT

In this study, chemical and mineralogical compositions, physical, microstructural and pozzolanic properties of Roman Period building bricks taken from Kızıl Avlu (*Serapeum*) in Pergamon and from several different buildings from ancient sites of Aigai and Nysa were determined by using XRF, XRD, FTIR, SEM-EDS and chemical analyses. Chemical compositions of bricks were evaluated by statistical analyses in order to identify whether or not these bricks were manufactured by using same natural raw material sources. Analyses results indicated that Roman period building bricks were manufactured by using calcium rich clay sources and fired at low temperatures (<900°C). Brick samples were mainly composed of quartz, albite, anorthite, muscovite and hematite. Statistically significant differences found in their chemical compositions revealed that local raw material sources were selected for the manufacturing of historic brick samples belonging to different cities.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: elifugurlu@iyte.edu.tr/ Tel: +90 232 750 7029

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toprak ve kil kullanılarak üretilen tuğlalar, insanlık tarihi boyunca en çok kullanılan yapı malzemelerinden olmuştur. Kerpiç tuğlalar yüzlerce yıl güneşte kurutularak üretilmiş ve bu şekilde üretilen tuğlalar özellikle Akdeniz'in doğusu ve Ortadoğu'da sıklıkla kullanılmıştır [1]. Tuğlaların pişirilme işleminin geçirilerek kullanılması ilk olarak MÖ 13. yüzyıl dolaylarında Mezopotamya'da olmuştur [2]. Batıda pişmiş tuğlaların yapım faaliyetlerinde yaygın olarak kullanımı Mezopotamya'dan yüzlerce yıl sonra Roma İmparatorluğu döneminde başlamıştır [3]. Pişmiş tuğlalar, batı mimarisinde MÖ 1. yüzyıla kadar yalnızca çatı kiremiti ve dekorasyon malzemesi olarak kullanılmış; MÖ 120 dolaylarında pişmiş tuğlanın avantajları keşfedilmiş ve pişmiş tuğlaların strüktürel elemanlarda kullanımına başlanmıştır [2]. Anadolu mimarisine pişmiş tuğla malzemenin girişi ise Roma İmparatorluğu merkezinin etkisi ile olmuştur [1]. Bergama'da bulunan Kızıl Avlu (veya Serapeum) Anadolu'da tuğla kullanımı açısından en önemli yapılardandır [1].

Roma döneminde tuğla üretimi hammadde kaynağının bulunması, hammaddenin öğütülmesi, su ile karıştırılması, kalıplara dökülerek şekillendirilmesi, kurutulması, pişirilmesi, depolanması ve yaşlandırılması işlemlerinden oluşan bir süreç olarak işliyordu [4]. Hammadde kaynağının seçiminde toprağın yüksek miktarda kil içermesine dikkat ediliyordu [3]. Seçilen hammadde kaynaklarının çoğunlukla tuğlaların üretildiği yere 10 km. yarıçap mesafesinde olduğu, ancak bazı durumlarda uygun hammadde kaynağına ulaşabilmek için 50 km.'den fazla mesafelerin katedilebildiği bilinmektedir [3]. Kil, hammadde kaynağından genellikle sonbaharda çıkarılır; su ile karıştırılmadan önce pişirme işlemi için gerekli odunlar toplanana kadar kışın birkaç ay dinlenmeye bırakılırdı [5]. Üretim sırasında kullanılan su miktarı, toprağın özelliklerine, plastisitesine ve üretim yapılan bölgenin iklim koşullarına göre değişirdi [3]. Kil ve su kullanılarak hazırlanan karışıma kimi zaman saman veya tuğla kırıkları da ilave edilirdi [4]. Bu işlemin ardından, elde edilen karışım, su veya kum ile kaplanmış ahşap kalıplara dökülüp açık havada kurumaya bırakılırdı [4]. Kuruyan tuğlalar, pişirilme işlemi için çoğunlukla konik yapıdaki, 5-40 m³ arasında değişen iç hacme sahip fırınlarla pişirme bölümüne açılan bir kapı açıklığından yerleştirilir, ateş yakıldığı zaman bu açıklık örülerek kapatılırdı [1]. Roma döneminde kullanılan tuğla fırınlarının yetersiz bir iç sıcaklık dağılımına sahip oldukları bilinmektedir. Fırının ısı kaynağına yakın bölümlerinde sıcaklık 1100°C'ye ulaşabilirken, üst kısımlara gidildikçe sıcaklık azalır 800°C'nin altına düşüyordu [2]. Fırında pişen tuğlaların ancak %10'u 950°C üstü sıcaklıklarda, %10'u da 650°C altı sıcaklıklara maruz kalmış oluyordu [3]. Pişirme işleminin süresi fırının boyutlarına, atmosferik koşullara ve yakıt olarak kullanılan malzemenin cinsine göre değişiyor [1] ve tuğlalar istenilen sertliğe ulaşana dek devam ediyordu [3]. Roma döneminde pişmiş tuğla üretiminin yaygınlaşması ile

tuğla üretim maliyetinin taş işçiliğinden ucuz olduğu anlaşılmış ve tuğla endüstrisi İmparatorluk altında bir devlet tekeli haline gelmiştir [3]. Böylelikle tuğla, hem Roma ve çevresinde hem de Anadolu da dahil olmak üzere pek çok bölgede önemli ve yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesi haline gelmiştir. Pişmiş tuğla kullanılarak inşa edilmiş Roma dönemi yapılarından günümüze dek ulaşmış olanlar arkeolojik ve mimari miras birer belge niteliğinde olmalarının yanı sıra Roma dönemi tuğla üretim teknolojilerine ışık tutabilmeleri açısından da büyük önem taşımaktadırlar.

Bu çalışmada, Batı Anadolu'da bulunan Bergama, Aigai ve Nysa antik kentlerinden alınan Roma dönemi yapı tuğlalarının özellikleri, hammadde kaynakları ve üretim teknolojilerinin aydınlatılması ve bu alanlarda gerçekleştirilecek koruma çalışmalarına katkı sağlanması amacıyla belirlenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, Bergama'da bulunan Kızıl Avlu (Serapeum) yapısı, Manisa'da bulunan Aigai ve Aydın'da bulunan Nysa antik kentlerinden alınan sekiz adet Roma dönemi tuğla örneğinin temel fiziksel özellikleri, kimyasal ve mineralojik kompozisyonları, mikroyapısal özellikleri ve puzolanik özellikleri belirlenmiştir. Örnekler Kızıl Avlu'da duvardan (KT-1, KT-2, KT-3), Aigai kentinde duvardan (AT), Nysa kentinde su deposu (NT-2) ve sarnıç (NT-3) yapılarında duvardan, hamam (NT-1) ve kütüphane (NT-4) yapılarında kemerden alınmıştır.

Tuğlaların temel fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için standart test yöntemleri kullanılmıştır [6]. Tuğlaların kuru (M_{kuru}), suya doymun (oda koşullarında (M_{oda}) ve düşük basınçta 24 saat bekletildikten sonraki (M_{vak})) ve su altındaki (Arşimet) ağırlıkları ölçülerek birim hacim ağırlık (gr/cm^3), % gözeneklilik, suya doymunluk katsayısı (S_{doy}) ve gözenek bağlantısalılığı (A_x) değerleri belirlenmiştir. Suya doymunluk katsayısı (Eş.1) ve gözenek bağlantısalılığı (Eş.2) aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S_{doy} = (M_{oda} - M_{kuru}) / (M_{vak} - M_{kuru}) \quad (1)$$

$$A_x = [(M_{vak} - M_{oda}) / M_{vak}] \times 100 \quad (2)$$

Tuğlaların kuruma hızları, yaklaşık 3x3x3 cm boyutlarında hazırlanmış örneklerin düşük basınçta suya doymun hale getirildikten sonra oda koşullarında kurumaya bırakılması ve ağırlık azalmalarının 15-30-60 dakika, 2-3-4 saat ve 1-2 gün aralıklar ile takip edilmesiyle belirlenmiştir.

Kimyasal kompozisyonlar, X ışını floresans (XRF) (Spectro IQ II) ve enerji dağılımlı X ışını spektrometresi (EDS) üniteli taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Philips XL 30S FEG) ile belirlenmiştir. XRF analizi ile tespit edilen ana ve eser element miktarlarına t-testi uygulanarak farklı alanlardan alınan örneklerin kimyasal kompozisyonlarına

göre istatistiksel olarak anlamlı gruplar altında toplanabilirliği tartışılmıştır. Mineralojik kompozisyonlar, X ışınları kırınım (XRD) (Philips X-Pert Pro X-ray Difraktometre) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) (PerkinElmer Spectrum BX) ile tespit edilmiştir. XRD analizleri toz haline getirilmiş örnekler üzerinde CuK α ışını kullanılarak 5-60 °2Theta arasında, saniyede 1,6° tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen kırınım desenleri Philips X-Pert Graphics and Identity programı kullanılarak değerlendirilmiştir. FTIR analizleri için toz halindeki örnekler saf KBr ile karıştırılarak yüksek basınç altında (yaklaşık 10 ton/cm²) pelletler hazırlanmıştır. Spektral ölçümler hazırlanan bu pelletler üzerinde 4000-400 cm⁻¹ aralıkta, 4 cm⁻¹ çözünürlükte ve transmittans modunda gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal özellikler taramalı elektron mikroskopunun (SEM) SE ve BSE dedektörleri kullanılarak belirlenmiştir. Puzolanik aktiviteler, doymuş kalsiyum hidroksit çözeltisinin toz haline getirilmiş tuğlaların (53 μ m'den küçük) ilave edilmeden önceki ve sonraki elektrik iletkenliğinin ölçülmesi ile saptanmıştır [7].

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

İncelenen Roma dönemi tuğla örneklerinin farklı analiz yöntemleri ile belirlenmiş temel fiziksel özellikleri, mineralojik kompozisyonları ve pişirilme sıcaklıkları, kimyasal kompozisyonları ve hammadde kaynakları, mikroyapısal ve puzolanik özellikleri bu bölümde aktarılmış ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

3.1. Temel Fiziksel Özellikler (Basic Physical Properties)

Roma dönemi tuğlalarının temel fiziksel özellikleri birim hacim ağırlık (gr/cm³), gözeneklilik (%), suya doymuluk katsayısı ve gözenek bağlantısallığı değerleri ile tanımlanmıştır. Yaklaşık 3-5 cm arasında değişen boyutlarda hazırlanan örnekler üzerinde standart test yöntemleri kullanılarak yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre Aigai'den ve Kızıl Avlu'dan alınan Roma

tuğlalarının birim hacim ağırlık ve gözeneklilik değerleri birbirlerine yakın aralıklardadır (Tablo 1). Nysa'dan alınan Roma dönemi tuğlalarının birim hacim ağırlık değerleri ise diğerlerine göre daha düşük, gözeneklilikleri daha yüksektir. İncelenen Roma dönemi tuğlalarının birim hacim ağırlık ve gözeneklilik değerleri farklı bölgelerde bulunan tarihi tuğlalar ile benzer aralıklardadır [8].

Suya doymuluk katsayısı (S_{doy}) su absorblamaya açık gözenek miktarının göstergesi olarak kullanılmaktadır. Suya doymuluk katsayısının düşüklüğü, tuğlaların donma dayanımlarının yüksek olduğunu gösterir. Suya doymuluk katsayısının 0.80'den az olması durumunda malzeme dona dayanıklı olarak kabul edilir [9]. Yapılan hesaplamalara göre yalnızca Kızıl Avlu'dan alınan tuğlaların 0.80'nin altında S_{doy} değerine sahip olduğu belirlenmiştir (Tablo 1). Elde edilen değerler Kızıl Avlu tuğlalarının dona dayanıklı kabul edilen sınırlarda olduğunu, Aigai ve Nysa'dan alınan tuğlaların donma dayanımlarının ise düşük olduğunu göstermiştir. Bu durum, Aigai ve Nysa tuğlalarının yapısındaki büyük boyutlu gözenek miktarının daha düşük olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Gözeneklerin birbirleri ile ilişkilerini belirleyebilmek için gözenek bağlantısallığı (A_x) hesaplanmıştır. Gözenek bağlantısallığı, tuğlaların gözenek yapısında bulunan ve doğal koşullar altında suyun ulaşmasının kolay olmadığı gözeneklerin varlığına işaret etmektedir [10]. Bu tip gözeneklerin varlığı tuğlaların pişirilmesi sırasında meydana gelen erimenin derecesine bağlı olarak gelişmektedir [10]. Daha yüksek pişirilme sıcaklıklarında erime daha fazla meydana gelmekte ve yüksek sıcaklıklarda üretilmiş tuğlalar daha yüksek A_x değerlerine sahip olmaktadır [11]. A_x değerinin yüksekliği tuz kristalizasyonu ve donma-erime döngülerine bağlı meydana gelebilecek bozulmalara dayanımının daha yüksek olabileceğini göstermektedir. İncelenen Roma dönemi yapı tuğlalarının içinde en yüksek gözenek bağlantısallığı değerlerine (A_x) Kızıl Avlu'dan alınan tuğlaların sahip olduğu saptanmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Roma tuğlalarının temel fiziksel özellikleri (Basic physical properties of Roman bricks)

	Birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	Gözeneklilik (%)	Suya doymuluk katsayısı (S_{doy})	Gözenek bağlantısallığı (A_x)
AT	1,71	29,58	0,89	2,04
KT-1	1,63	32,65	0,79	3,62
KT-2	1,67	30,85	0,73	4,55
KT-3	1,73	28,90	0,78	3,42
NT-1	1,40	44,53	0,93	1,74
NT-2	1,32	46,97	0,96	1,07
NT-3	1,63	47,55	0,94	1,41
NT-4	1,33	47,69	0,91	2,37

KT: Kızıl Avlu tuğla, AT: Aigai tuğla, NT: Nysa tuğla

Tuğlaların kuruma hızları yüzeyden buharlaşan suyun belirli zaman aralıklarında neden olduğu ağırlık azalmalarının takibi ile tanımlanmıştır. İncelenen Roma tuğlalarının bazılarının boyutlarının (KT-2, KT-3, NT-2) bu test için yeterli olmaması nedeniyle beş örneğin (AT, KT-1, NT-1, NT-3, NT-4) kuruma hızları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre incelenen bütün tuğla örneklerinde absorblanmış suyun yaklaşık % 50'si 30 dakika içerisinde buharlaşmıştır (Şekil 1). Bu da tuğlaların yapısında bulunan büyük boyutlu gözeneklerin ($>2\mu\text{m}$) oranının yüksek olabileceğini göstermektedir [11]. Büyük boyutlu gözeneklerin fazla olması Roma dönemi tuğlalarının donma-erime ve tuz kristalizasyonu döngülerine dayanımlarının yüksek olmasını sağlamaktadır [12].

Kuruma hızları belirlenen tuğla örneklerinin A_x değerleri karşılaştırıldığında iki değer arasında paralellik olduğu gözlenmektedir. Her iki değer için de örnekler $\text{KT-1} > \text{NT-4} > \text{AT} > \text{NT-1} > \text{NT-3}$ şeklinde sıralanmaktadır. Kızıl Avlu'dan alınan Roma tuğlalarının gözenek bağlantısalılığı değerleri ve kuruma hızları diğer alanlardan alınan tuğlalardan yüksektir. Bu durum, Kızıl Avlu tuğlalarının tuz kristalizasyonu ve donma-erime döngülerine karşı dayanımlarının daha yüksek olabileceğini gösterir.

3.2. Mineralojik Kompozisyonlar ve Pişirilme Sıcaklıkları (Mineralogical Compositions and Firing Temperatures)

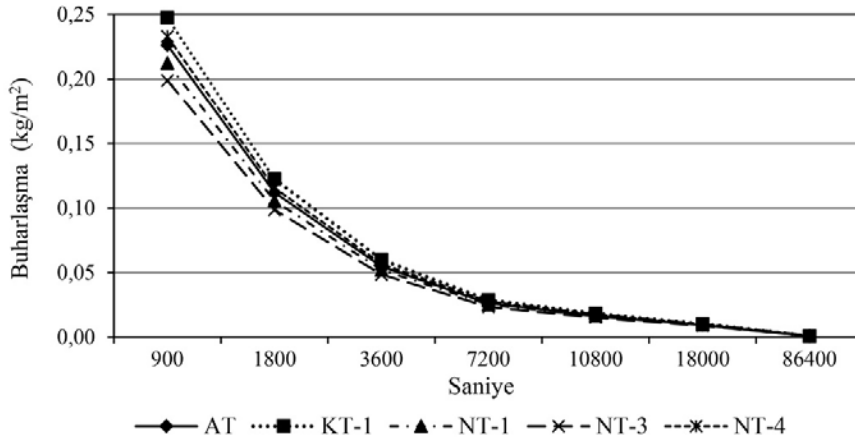
Roma dönemi yapı tuğlalarının mineralojik kompozisyonları, XRD ve FTIR analizleri ile belirlenmiştir. XRD kırınım desenleri, tuğlaların temel olarak kuvars (SiO_2), albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), muskovit ($\text{KAl}_2(\text{AlSiO}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$) ve hematit (Fe_2O_3) minerallerinden oluştuğunu göstermektedir (Şekil 2). İncelenen tüm tuğla örneklerinin XRD kırınım desenleri birbirine benzer niteliktedir. Yalnızca N3 ve N4 örneklerinde kalsit (CaCO_3) mineraline ait pikler tespit edilmiştir.

Tuğlaların üretimleri sırasındaki pişirme işlemi, kullanılan hammaddenin mineralojik yapısında değişime neden olmaktadır. Farklı sıcaklık aralıklarında oluşan farklı

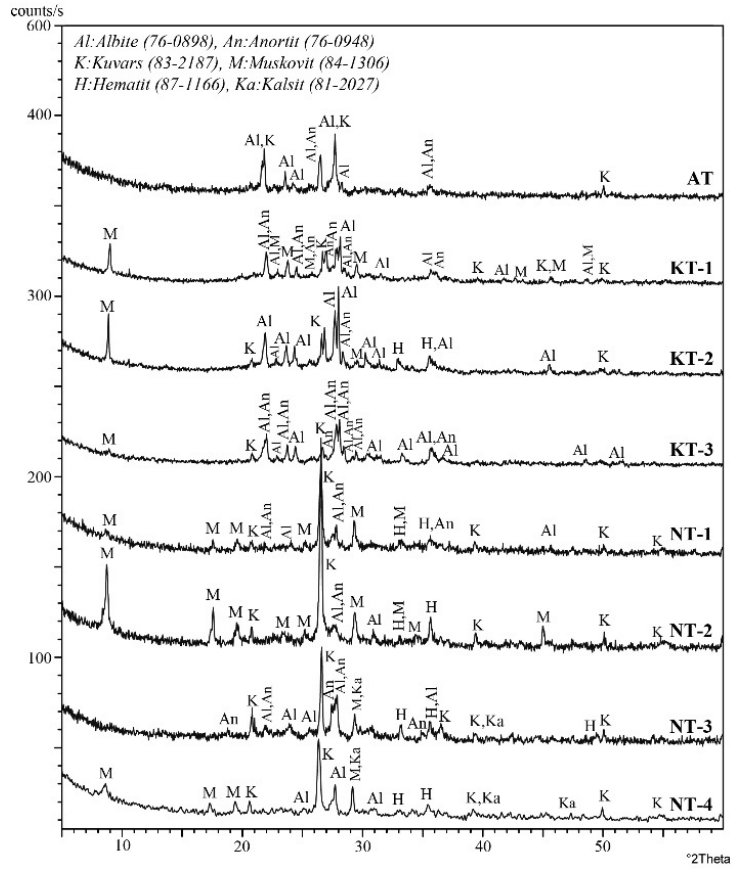
mineraller bu nedenle tuğlaların pişirilme sıcaklıkları hakkında bilgi verebilmektedir [13]. Örneğin, tuğlaya puzolanik özellik veren metakaolin gibi amorf maddeler $450\text{-}800^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında killerin kristal yapısının bozulmasına bağlı olarak oluşmaktadır [14]. İllit ve muskovit 700°C civarındaki sıcaklıklarda gözlenirken, sıcaklığın artması ile bu minerallerin miktarları azalmakta, 900°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda yok olmaktadır [15]. Muskovit 1000°C 'nin üstünde tamamen mullite dönüşmektedir [10]. Gehlenit 800°C dolaylarındaki sıcaklıklarda oluşmakta, 900°C üstünde konsantrasyonu artmakta, 1000°C üstünde ise tamamen yok olmaktadır [16]. Hematit ve anortit 850°C 'den itibaren, volastonit 1000°C üstü sıcaklıklarda oluşmaktadır [16]. Kalsit ve dolomit 800°C civarında varlıklarını sürdürmeye devam ederken 870°C üstü sıcaklıklarda dekompozisyona uğramaya başlamaktadır [10]. Yüksek pişirilme sıcaklıklarında oluşan mineraller tuğlaların puzolanik aktivitelerinin kaybolmasına neden olabilmektedir [17].

İncelenen Roma dönemi tuğlalarında muskovitin ve kalsitin tespit edilmiş olması bu tuğlaların pişirilme sıcaklıklarının 900°C 'yi geçmediğini göstermektedir. Hematit ve anortitin varlığı ise pişirilme sıcaklıklarının 850°C 'nin altında olmadığını ortaya koymaktadır. Bu nedenlerle, bu tuğlaların $850\text{-}900^\circ\text{C}$ arasındaki pişirilme sıcaklıkları ile üretildikleri sonucuna ulaşılabilir. Bu sıcaklık aralığında pişirilmiş kalsiyumca zengin hammaddeden üretilen tuğlaların yapısında $1\mu\text{m}$ 'den küçük boyutlu gözeneklerin toplam gözenekler içinde çoğunlukta olduğu ($\sim 60\%$) bilinmektedir [10]. Tuğlaların düşük sıcaklıklarda pişirilerek üretilmiş olmaları Roma dönemi tuğla fırınlarının teknolojisi ile açıklanabilir.

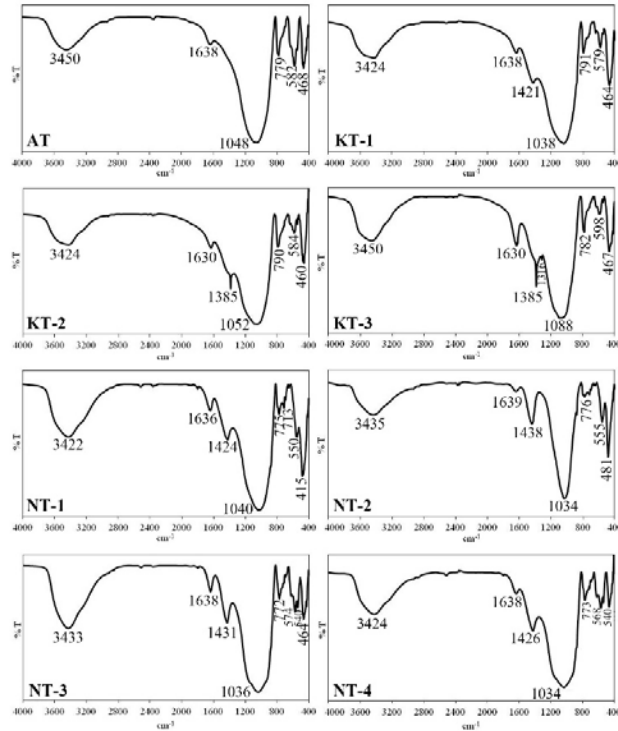
FTIR spektrumlarında (Şekil 3) $3422\text{-}3450\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen O-H gerilme bandı ve $1636\text{-}1639\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen H-O-H eğilme bantları tuğlaların yapısında absorblanmış suya bağlıdır. $1421\text{-}1438\text{ cm}^{-1}$ ve 1385 cm^{-1} 'de bulunan $(\text{CO}_3)^{2-}$ gerilme bantları tuğlaların yapısında bulunan kalsitin varlığına işaret eden karbonat iyonlarının farklı fazlarını göstermektedir. $1034\text{-}1088\text{ cm}^{-1}$ ve $772\text{-}791\text{ cm}^{-1}$ aralıklarındaki Si-O gerilme bantları ile $460\text{-}481\text{ cm}^{-1}$



Şekil 1. Roma tuğlalarının kuruma hızları (Drying rates of Roman bricks)



Şekil 2. Roma tuğlarının XRD kırınım desenleri (XRD patterns of Roman bricks)



Şekil 3. Roma tuğlarının FTIR spektrumları (FTIR spectrums of Roman bricks)

aralığındaki Si-O-Si asimetrik eğilme bandı kuvars mineraline bağlıdır. XRD analizleri ile belirlenmiş olan muskovitin FTIR spektrumunda en büyük pikinin beklendiği 1030-1060 cm^{-1} aralığı ise kuvars ile çakışmaktadır. 549-554 cm^{-1} aralığında belirlenen Fe-O gerilme bantları hematitin varlığından kaynaklanmaktadır. 539-580 cm^{-1} aralığında tespit edilen Si-O-Al gerilme bantları anortit mineralinin varlığını göstermektedir. 415-427 cm^{-1} aralığındaki Si-O deformasyon bandı albit mineraline bağlı olarak bulunmaktadır. 3800-3600 cm^{-1} aralığında kil minerallerinin varlığına bağlı olarak ortaya çıkan O-H gerilme bantlarının Roma dönemi tuğlalarının FTIR spektrumlarında gözlenmemiş olması bu tuğlaların hammaddelerinde bulunan killerin pişirme işlemi sırasında tamamen dehidrasyona uğradıklarını göstermektedir [18].

3.3. Kimyasal Kompozisyonlar ve Hammadde Kaynakları (Chemical Compositions and Raw Material Sources)

Roma dönemi tuğlalarının temel oksit ve eser element kompozisyonları X ışını floresans (XRF) analizleri ile belirlenmiştir. İncelenen Roma dönemi tuğlaları temel olarak SiO_2 (%48-60), Al_2O_3 (%17-23) ve daha düşük oranlarda CaO (%5-10), Fe_2O_3 (%5-8), MgO (%2-5), K_2O (%3-4) ve Na_2O (%0,5-2)'den meydana gelmektedir (Tablo 2). İçerdikleri CaO miktarı incelenen tuğlaların hepsinin kalsiyumca zengin kil içeren hammadde kaynakları

kullanılarak üretildiklerini göstermektedir. Hammaddenin içerdiği karbonatın özellikle düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen üretimlerde tuğlanın geçirdiği yapısal değişimler üzerinde olumlu etkilere sahip olduğu bilinmektedir [11]. Karbonatlar pişirme işlemi sırasında meydana gelen büzülme azaltmakta, daha yüksek vitrifikasyon elde edilmesini sağlamakta ve tuğlaların basınç dayanımını arttırmaktadır [19]. Ayrıca karbonat içeren kil ile üretilen tuğlaların rengi üzerinde pişirme ve fırın koşullarının daha az etkisi olmaktadır [11]. Yüksek pişirme sıcaklıklarına ulaşamayan ve yetersiz bir sıcaklık dağılımına sahip Roma dönemi tuğla fırınlarında, tuğla üretimi için hammadde olarak kalsiyumca zengin killerin seçilmiş olması karbonatların tuğla üretimi için sağladığı bu avantajlardan yararlanmak ile açıklanabilir.

XRF analizleri ile Roma dönemi tuğlalarının eser element kompozisyonları da ppm cinsinden belirlenmiştir. Belirlenen eser elementler P, S, V, Mn, Ni, Cu, Zn, Se, Br, Sr, Zr, Cd ve Pb'dir (Tablo 3).

Belirlenen temel oksit ve eser element kompozisyonları tuğlaların üretiminde kullanılan hammadde kaynakları ile ilgili olarak da bilgi sağlamaktadır. Özellikle eser element kompozisyonları tuğlaların üretildikleri hammadde kaynakları ile ilgili önemli bir belirleyici olarak kabul edilmektedir [20]. Bunun en önemli nedeni eser elementler

Tablo 2. Roma tuğlalarının temel oksit kompozisyonları (%) (Major oxide compositions of Roman bricks (%))

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
AT	60,10	1,1480	18,79	5,878	1,955	4,822	1,133	3,130
KT-1	58,19	0,8254	17,41	5,427	2,891	5,158	1,132	2,636
KT-2	58,88	0,8597	17,28	5,080	2,807	4,849	1,277	3,126
KT-3	53,51	0,7646	16,77	4,928	2,799	6,471	1,634	3,004
NT-1	48,00	0,9050	18,47	7,317	5,111	7,368	0,594	3,287
NT-2	48,55	1,0320	22,56	8,385	3,527	4,526	0,520	3,985
NT-3	50,36	0,9796	21,18	6,488	3,314	9,009	0,797	3,072
NT-4	48,33	0,9371	20,15	6,257	3,223	10,43	0,778	2,961

Tablo 3. Roma tuğlalarının eser element kompozisyonları (ppm) (Trace element compositions of Roman bricks (ppm))

	P	S	V	Mn	Ni	Cu	Zn	Se	Br	Sr	Zr	Cd	Pb
AT	2671	119	234	1102	209	6410	373	27	14,5	389	313	595	16
KT-1	1262	510	243	722	140	5794	274	27	0	524	211	581	41
KT-2	1539	541	163	484	137	5799	293	0	0	570	226	592	25
KT-3	780	1842	138	567	435	5771	290	31	2,7	546	180	605	28
NT-1	937	78	159	677	350	5913	302	39	5,6	282	269	554	16
NT-2	1164	74	257	833	238	5686	341	0	0	230	293	580	23
NT-3	1324	73	170	589	170	4926	300	24	1,5	427	294	596	9
NT-4	1279	69	161	568	179	5832	276	0	0	786	264	573	4

ve miktarlarının pişirilme işlemi sırasında değişime uğramaması ve bundan dolayı pişmiş tuğlanın ve tuğlanın üretildiği hammadde kaynağının eser element kompozisyonunun birbiri aynı olmasıdır [5]. Kimyasal kompozisyonların benzerliklerine göre istatistiksel olarak oluşabilen anlamlı gruplar, oluşan grup içindeki tuğlaların aynı hammadde kaynağı kullanılarak üretilmiş olduklarına işaret etmektedir. Bu nedenle, t-testi yöntemi kullanılarak temel oksit ve eser elementlere göre aynı alandan alınan tuğlaların istatistiksel olarak birbirleri ile anlamlı gruplar oluşturup oluşturmadığı belirlenmiştir. T-testi en az üç örnek üzerinden grup oluşturabildiği için Aigai'den alınan Roma dönemi tuğlası istatistik analizden ayrı tutulmuştur. T-testin uygulanmasında tek kuyruklu hipotez yöntemi kullanılmıştır. Buna göre test edilen boş ve alternatif hipotezler şöyledir:

Boş hipotez $H_0: \mu_{Kızıl\ Avlu,i} = \mu_{Nysa,i}$
 Alternatif hipotez $H_a: \mu_{Kızıl\ Avlu,i} > \mu_{Nysa,i}$ veya $\mu_{Kızıl\ Avlu,i} < \mu_{Nysa,i}$

$\mu_{Kızıl\ Avlu,i}$ i elementi için Kızıl Avlu örneklerinin yüzde olarak ortalamasını $\mu_{Nysa,i}$ yine i elementi için Nysa örneklerinin yüzde olarak ortalamasını temsil etmektedir. P değerinin 0.1 anlamlılık derecesinin altında bulunması alternatif hipotezinin kabulü anlamına gelir ki bu da sıranan elementin iki grubu iyi ayırttığını ve iki farklı (anlamlı) grup oluşturduğunu gösterir.

Kızıl Avlu ve Nysa'dan alınan Roma dönemi tuğlalarının temel oksit kompozisyonlarının t-testi sonucunda elde edilen P değerlerinin neredeyse tamamı 0.1'den küçüktür (Tablo 4). Yalnızca K_2O 'nun P değeri 0.1'den büyüktür. Bu sonuçlar, temel oksit kompozisyonlarına göre iki alandan alınan tuğla örneklerinin kendi içlerinde anlamlı olarak benzer ve birbirileri ile anlamlı olarak farklı gruplar oluşturduklarını göstermektedir.

Eser element kompozisyonlarına uygulanan t-test sonucunda Kızıl Avlu ve Nysa'dan alınan Roma dönemi tuğlalarının S, Zr, Cd, Pb elementleri için P değerleri 0,1'in altında çıkmıştır (Tablo 5). Bu durum, bu elementlere göre Kızıl Avlu ve Nysa tuğlalarının birbirinden farklı ve anlamlı gruplar oluşturabildiğini göstermektedir.

Temel oksit ve eser element kompozisyonlarının her ikisi için de istatistiki olarak kendi içinde benzer ve birbirinden farklı grupların belirlenmesi Kızıl Avlu ve Nysa'dan alınan Roma dönemi tuğlalarının farklı hammadde kaynakları kullanılarak üretilmiş olduklarını net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Tek örnek olduğu için istatistik hesaplara alınamayan Aigai'den alınan tuğlanın Kızıl Avlu ve Nysa'dan alınan tuğlalar ile karşılaştırması ise temel oksit kompozisyonlarına göre t-testinde daha düşük P değerini

Tablo 4. Kızıl Avlu ve Nysa'dan alınan tuğlaların ortalama temel oksit kompozisyonları (%) ve t-testi sonucunda elde edilen P değerleri (Mean values of major oxide compositions (%) and P values obtained from t-test of bricks from Kızıl Avlu and Nysa)

	Kızıl Avlu Ortalama (%)	Nysa Ortalama (%)	P Değeri
SiO ₂	56,9	48,8	0,016
TiO ₂	0,8	1,0	0,007
Al ₂ O ₃	17,2	20,6	0,013
Fe ₂ O ₃	5,1	7,1	0,011
MgO	2,8	3,8	0,059
CaO	5,5	7,8	0,082
Na ₂ O	1,3	0,7	0,014
K ₂ O	2,9	3,3	0,101

Tablo 5. Kızıl Avlu ve Nysa'dan alınan tuğlaların ortalama eser element kompozisyonları (ppm) ve t-testi sonucunda elde edilen P değerleri (Mean values of trace elements compositions (ppm) and P values obtained from t-test of bricks from Kızıl Avlu and Nysa)

	Kızıl Avlu Ortalama (ppm)	Nysa Ortalama (ppm)	P Değeri
P	1193,5	1176,01	0,473
S	964,3	73,2	0,090
V	181,1	186,8	0,447
Mn	591	666,8	0,226
Ni	237	234,2	0,490
Cu	5788	5589,3	0,222
Zn	285,5	304,6	0,128
Se	19,3	15,6	0,398
Br	0,9	1,8	0,304
Sr	546,6	431,3	0,213
Zr	205,5	280	0,007
Cd	592,7	575,6	0,089
Pb	31,6	13,1	0,021

vermiş olan Na_2O , SiO_2 , Fe_2O_3 ve TiO_2 üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda Aigai'den alınan tuğlanın Kızıl Avlu ve Nysa'dan alınan tuğlaların oluşturduğu gruplardan farklılık gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4). Bu durum Aigai'den alınan tuğlanın üretimi için de farklı bir hammadde kaynağının kullanılmış olduğunu göstermektedir.

3.4. Mikroyapısal Özellikler (Microstructural Properties)

Roma dönemi tuğlalarının mikroyapısal özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile belirlenmiştir. SEM görüntülerinde tuğlaların kısmen vitrifikasyona uğramış oldukları gözlenmektedir (Şekil 5). Tuğlaların yapısındaki silika kristallerinde ise deformasyonlar oluşmaya ve kristaller arasında öbeklenmeler meydana gelmeye başlamıştır (Şekil 5). Bu gözlemler, incelenen Roma dönemi tuğlalarının pişirilme sıcaklıklarının 900°C 'yi aşmadığını göstermektedir [10].

Roma dönemi tuğlalarının yapısında bulunan gözenekler çoğunlukla düzensiz şekilli ve keskin açılı bir yapıdadır (Şekil 5). Tuğlaların yapısındaki gözeneklerin şekilleri ve büyüklükleri pişirilme sıcaklıklarına göre değişiklik göstermektedir. Gözeneklerin 900°C civarındaki sıcaklıklarda açılabilir bir yapıda olduğu; 1000°C civarındaki sıcaklıklarda daha amorf ve elipsoid şeklinde bir form aldığı; 1100°C civarında ise bir araya gelerek hücresel bir yapıya başlamakta olduğu bilinmektedir [10]. İncelenen Roma dönemi tuğlalarının gözenek yapısı tuğlaların pişirilme sıcaklıklarının 900°C civarında kaldığını doğrulamaktadır. Gözenek boyutlarının genel olarak $3\mu\text{m}$ 'den büyük olduğu ölçülmüştür (Şekil 6). Büyük boyutlu gözeneklerin varlığı tuğlaların tuz kristalizasyonu ve donma-erime döngülerinden kaynaklı bozulmalara karşı dayanımlarının daha yüksek olduğunu göstermektedir.

3.5. Puzolanik Özellikler (Pozzolan Properties)

Roma dönemi yapı tuğlalarının puzolanik aktiviteleri, doygun kalsiyum hidroksit çözeltisi ile girdikleri reaksiyonun takip edilmesiyle belirlenmiştir. Çözeltinin $53\mu\text{m}$ 'den küçük boyutlu tuğla tozları ilave edilmeden önce

ve edildikten sonraki elektrik iletkenliği değerleri ölçülmüştür. İki değer arasındaki farkın 1.2 mS/cm ve üzeri olduğu durumlarda tuğlalar puzolanik kabul edilirler [7]. İncelenen tuğlaların elektrik iletkenliği farkları Aigai'den alınan örnekte $0,56$; Kızıl Avlu'dan alınan örneklerde $0,02-0,45$ arasında; Nysa'dan alınan örneklerde $0,82-0,91$ arasındadır. Bu nedenle, bu tuğlaların puzolanik özellik göstermediği sonucuna ulaşılmaktadır.

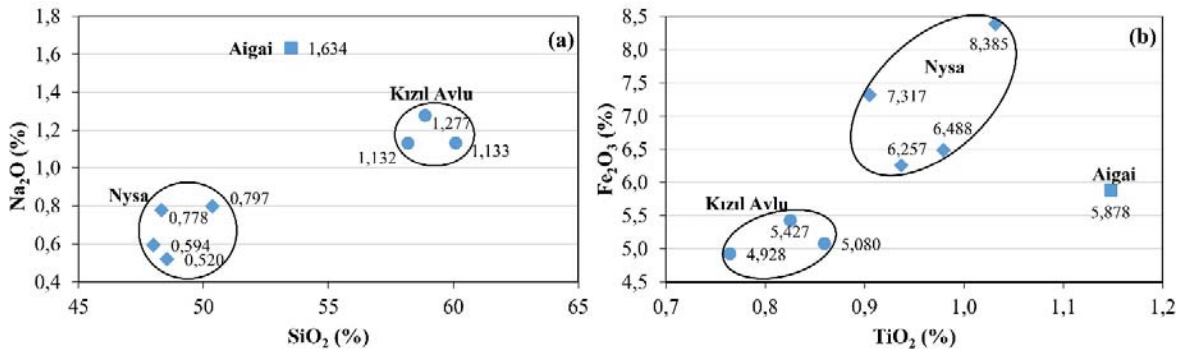
Roma dönemindeki fırın koşullarına bağlı olarak düşük sıcaklıklarda ($850-900^\circ\text{C}$) üretilmiş ve yapılarında mullit, kristobalit gibi yüksek sıcaklık mineralleri bulunmayan bu tuğlaların puzolanik özelliğe sahip olmamaları, üretimlerinde kullanılan hammadde kaynağının puzolanik amorf yapılar oluşması için yeterli miktarda kil minerali içermemesi ile açıklanabilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

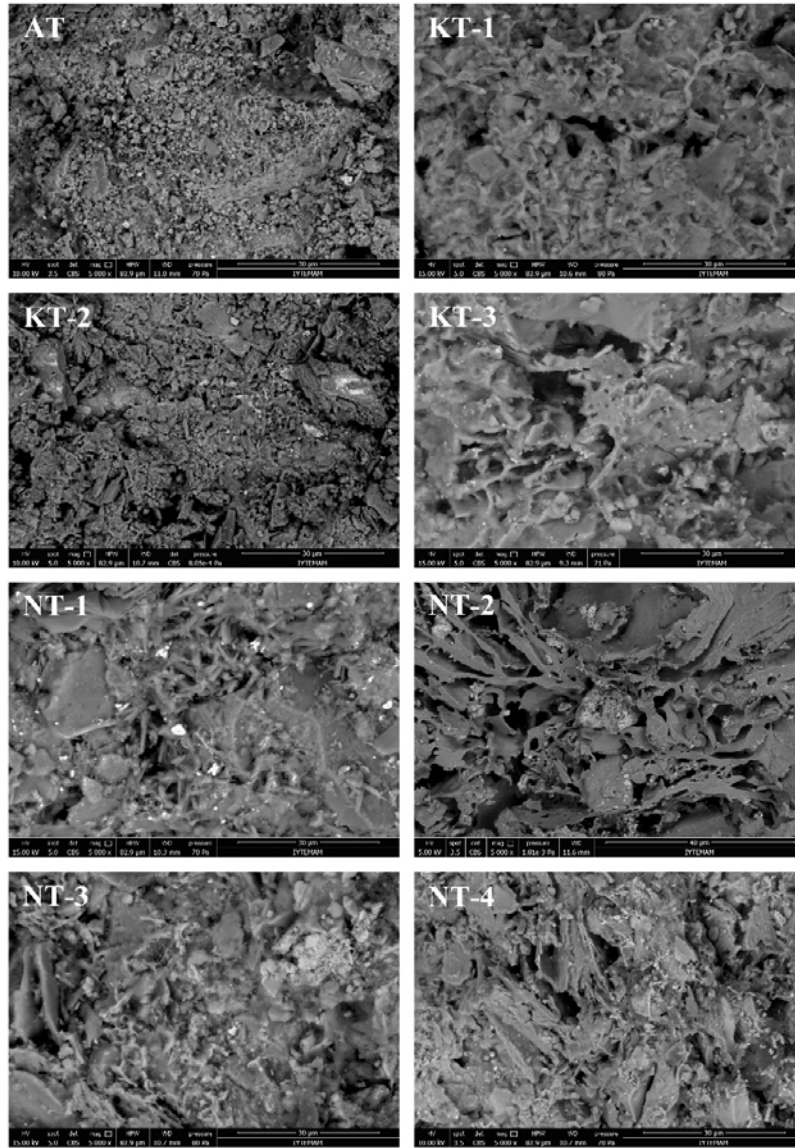
Kızıl Avlu (Serapeum) yapısı ile Aigai ve Nysa antik kentlerinde bulunan farklı yapılardan alınan Roma dönemi tuğlaları düşük yoğunluklu ve yüksek gözenekli malzemelerdir. Tuğlaların gözenek yapısında büyük boyutlu gözeneklerin oranı toplam gözenekler içinde daha yüksektir. Bu durum tuğlaların tuz kristalizasyonu ve donma-erime döngülerine bağlı meydana gelebilecek bozulmalara dayanımını arttırmaktadır.

Roma dönemi tuğlaları kalsiyum karbonatca zengin kil kaynakları kullanılarak ve 900°C 'yi geçmeyen sıcaklıklarda pişirilerek üretilmişlerdir. Kalsiyumca zengin kil kaynaklarının kullanılmış olması, karbonatların pişirme sırasındaki büzülme azaltma ve daha yüksek vitrifikasyon sağlama etkileri ile açıklanabilir. Tuğlaların düşük pişirme sıcaklıkları kullanılarak üretilmiş olmaları, Roma dönemi tuğla fırınlarının teknolojilerinin yüksek pişirme sıcaklıklarına ulaşamaması ve homojen olmayan bir iç sıcaklık dağılımına sahip olmalarından kaynaklanmaktadır.

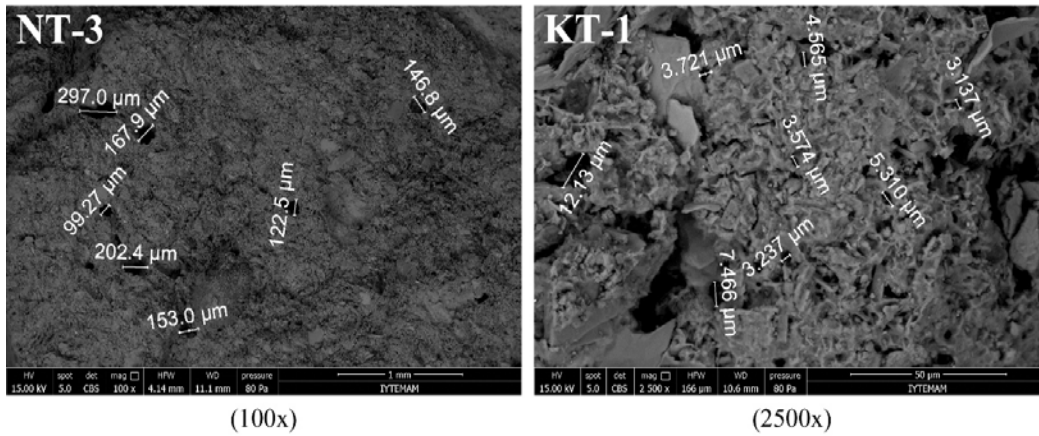
Tuğlalar, düşük sıcaklıkta ($<900^\circ\text{C}$) pişirilerek üretilmiş olmalarına rağmen puzolanik özellik göstermemektedirler. Bu seçilen hammadde kaynaklarının yeterli miktarda kil minerali içermediklerini göstermektedir.



Şekil 4. Roma tuğlalarının $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (a) ve $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ (b) içeriklerinin karşılaştırması (Comparison of $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (a) and $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ (b) content of Roman bricks)



Şekil 5. Roma tuğlarının SEM görüntüleri (5000x) (SEM images of Roman bricks (5000x))



Şekil 6. Roma tuğlarının gözenek boyutlarını gösteren SEM görüntüleri (SEM images showing the pore sizes of Roman bricks)

Roma dönemi tuğlalarının temel oksit ve eser element kompozisyonlarının birbirlerinden anlamlı şekilde farklılık gösteriyor olması tuğlaların üretiminde farklı hammadde kaynaklarının kullanılmış olduğunu göstermektedir. Farklı hammadde kaynaklarının kullanımı, Roma İmparatorluğu'nun merkezinde olduğu gibi Anadolu'da da malzeme üretimi için yerel kaynaklarının tercih edildiğini ortaya koymaktadır.

Roma dönemi yapılarında gerçekleştirilecek koruma çalışmalarında, tuğlaların önemli bir üretim teknolojisinin ürünü olan ve hem bu üretim teknolojisini hem de Roma dönemi mimarlığını yansıtan tarihi bir belge niteliğindeki malzemeler olduğu unutulmamalıdır. İlk olarak özgün tuğlaların yerlerinde korunması hedeflenmeli, değişikliğin veya tamamlamaların zorunlu olduğu durumlarda ise Roma dönemi tuğlalarının fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ile uyumlu tuğlalar özel olarak üretilmelidir. Yeni üretilen bu tuğlalar için yerel hammadde kaynakları araştırılmalı, modern üretim tekniklerinden kaçınarak geleneksel yöntemler tercih edilmeli ve düşük pişirme sıcaklıkları kullanılmalıdır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

XRD, XRF ve SEM-EDS analizlerinin gerçekleştirildiği İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Araştırma Merkezi uzman ve yöneticilerine teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ward-Perkins J.B., Roman Imperial Architecture, Yale University Press, New Haven&London, 1981.
2. Adam J.P., Roman Building Materials and Techniques (First published in 1937), Çeviri: Anthony Mathews, Routledge, Londra&New York, İngiltere&A.B.D., 2005.
3. Schallenghe R., Barello F., Saiano F., Ferrara E., Fontaine C., Caner L., Olivetti E., Boni I., Petit S., Material sources of the Roman brick-making industry in the I and II Century A.D. from Regio IX, Regio XI and Alpes Cottiae, *Quat. Int.*, 357, 189-206, 2015.
4. MacDonald W.L., The Architecture of the Roman Empire, Yale University Press, New Haven&London, 1965.
5. Finlay A.J., McComish J.M., Ottley C.J., Bates C.R., Selby D., Trace element fingerprinting of ceramic building material from Corpow and York Roman fortresses manufactured by the VI Legion, *J. Archaeolog. Sci.*, 39, 2385-2391, 2012.
6. RILEM, Tests defining the structure, *Mater. Constr.*, 13 (75), 177-181, 1980.
7. Luxán M.P., Madruga F., Saavedra J., Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products of conductivity measurement, *Cem. Concr. Res.*, 19, 63-68, 1989.
8. Stefanidou M., Papayianni I., Pachta V., Analysis and characterization of Roman and Byzantine fired bricks from Greece, *Mater. Struct.*, 48, 2251-2260, 2015.
9. ASTM International, ASTM C67-07 Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, West Conshohocken, PA, 2007.
10. Cultrone G., Sebastián E., Elert K., De La Torre M.J., Cazalla O., Rodriguez-Navarro C., Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks, *J. Am. Ceram. Soc.*, 24, 547-564, 2004.
11. Elert K., Cultrone G., Rodriguez-Navarro C., Pardo E.S., Durability of bricks used in the conservation of historic buildings - influence of composition and microstructure, *J. Cult. Heritage*, 4, 91-99, 2003.
12. Carratero M.I., Dondi M., Fabbri B., Raimondo M., The influence of shaping and firing technology on ceramic properties of calcareous and non-calcareous illitic-chloritic clays, *Appl. Clay Sci.*, 20, 301-306, 2002.
13. He C., Osbaeck B., Makavicky E., Pozzolan reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects, *Cem. Concr. Res.*, 25/8, 1691-1702, 1995.
14. Hopa D.Y., Özel E., Effect of Kaolin type on pyroplastic deformation of sanitaryware porcelain body, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (2), 313-322, 2016.
15. Rodrigues S.F.S., da Costa M.L., Pöllmann H., Kern D.C., da Silveira M.I., Kipnis R., Pre-historic production of ceramics in the Amazon: Provenience, raw materials, and firing temperatures, *Appl. Clay Sci.*, 107, 145-155, 2015.
16. Cardiano P., Ioppolo S., De Stefano C., Pettignano A., Sergi S., Piraino P., Study and characterization of the ancient bricks of monastery of San Filippo di Fragalá in Frazzanò (Sicily), *Anal. Chim. Acta*, 519, 103-111, 2004.
17. Sujeong L., Kim Y.J., Moon H.S., Phase transformation sequence from kaolinite to mullite investigated by an energy-filtering transmission electron, *J. Am. Ceram. Soc.*, 10, 2841-2848, 1999.
18. Nirmala G., Viruthagiri G., FT-IR characterization of articulated ceramic bricks with wastes from ceramic industries, *Spectrochim. Acta, Part A*, 126, 129-134, 2016.
19. Tite M.S., Maniatis Y., Examination of ancient pottery using the scanning electron microscope, *Nature*, 257, 122-123, 1975.
20. Mommsen H., Provenance determination of pottery by trace element analysis: problems, solutions and applications, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 247 (3), 657-662, 2001.