



## **Nysa Antik Kenti Cam Örneklerinde Arkeometrik İncelemeler**

### Archaeometric Examinations of Glass Samples from Nysa Ancient City

**Emine TORGAN GÜZEL<sup>1</sup>, Ali Akın AKYOL<sup>2</sup>, Rahşan POLAT<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Turkish Cultural Foundation (TCF), Cultural Heritage Preservation and Natural Dyes Laboratory  
(DATU Laboratuvarı)

· [torganemine@gmail.com](mailto:torganemine@gmail.com) · ORCID > 0000-0002-2539-9738

<sup>2</sup>Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Bölümü,  
Ankara

· [aliakinakyol@gmail.com](mailto:aliakinakyol@gmail.com) · ORCID > 0000-0002-4174-575X

<sup>3</sup>Anadolu Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Arkeoloji, Eskişehir

· [rahsantp@anadolu.edu.tr](mailto:rahsantp@anadolu.edu.tr) · ORCID > 0000-0002-5002-9560

#### Makale Bilgisi/Article Information

**Makale Türü/Article Types:** Araştırma Makalesi/Research Article

**Geliş Tarihi/Received:** 24 Temmuz/July 2024

**Kabul Tarihi/Accepted:** 18 Eylül/September 2024

**Yıl/Year:** 2024 | **Cilt – Volume:** 2 | **Sayı – Issue:** 4 | **Sayfa/Pages:** 243-269

**Atıf/Cite as:** Torgan Güzel, E., Akyol, A. A., Polat, R. "Nysa Antik Kenti Cam Örneklerinde Arkeometrik İncelemeler"  
Propontica, 2 (4), Eylül 2024: 243-269.

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Emine Torgan Güzel

## NYSA ANTİK KENTİ CAM ÖRNEKLERİNDE ARKEOMETRİK İNCELEMELER

### ÖZ

Batı Anadolu'da bulunan ve Aydın ilinin Sultanhisar ilçesi yakınında yer alan Nysa antik kenti kazı çalışmalarında ele geçen cam buluntuların kimyasal içeriklerinin belirlenmesi amacıyla arkeometrik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Anadolu'da cam üretimi ve teknolojisi ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Anadolu coğrafyasında bulunan cam örneklerin tarihçesi, durumu, üretim teknolojisi ve kimyasal kompozisyonunun belirlenebilmesi için örneklerin çeşitli analitik yöntem ve teknikler kullanılarak bilimsel olarak incelenmesi gereklidir.

Bu çalışmada, cam buluntuların öncelikle fiziksel durumları incelenmiş, kalınlıkları belirlenmiş, renkleri kromametrik olarak tanımlanmış ve fotoğraflanarak belgelenmiştir. Örnekler, polarize edilmiş enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (PED-XRF) ve enerji dağılımlı X-ışını taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDX) kullanılarak incelenmiştir. Böylece örneklerin yapı ve kimyasal kompozisyonları tanımlanmıştır. Cam örneklerin üretim teknolojileri hakkında bilgiler için SEM ile dokuz ayrı cam örnek yüzeyinden farklı büyüklüklerde görüntüler elde edilmiştir. Bu görüntülerden cam örneklerin serbest üfleme, silindir üfleme ya da döküm teknikleri ile üretildiği belirlenmiştir. Kimyasal içerikleri olarak her iki analizde de düşük oranda  $\text{SiO}_2$  belirlenmesine rağmen camların tipik bir silis-soda-kireç camı olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda ergitici madde olarak sodaca zengin minerallerin (natron, sodyum karbonat, vb.) kullanıldığı saptanmış ve camların üretiminde aynı hammaddenin kullanılmış olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, analiz edilen cam örneklerine renk veren maddenin  $\text{Fe}^{2+}$  ve  $\text{Cu}^{2+}$  iyonları olduğu saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Nysa Antik Camları, Arkeometri, Karakterizasyon, PED-XRF, SEM-EDX.



## ARCHAEOLOGICAL EXAMINATIONS OF GLASS SAMPLES FROM NYSA ANCIENT CITY

### ABSTRACT

Archaeometric examinations were carried out to determine the chemical contents of the glass finds recovered during the excavations of the ancient city of Nysa, located near the Sultanhisar district of Aydın province in Western Anatolia.

In this study, the physical conditions of the glass samples were first examined, their thicknesses were determined, and their colors were defined chromametricaly and documented by photography. The samples were examined using polarized energy-dispersive X-ray spectrometry (PED-XRF) and energy-dispersive X-ray scanning electron microscopy (SEM-EDX), thus identifying the structure and chemical composition of the samples. To obtain information about the production technologies of glass samples, images of different sizes were obtained from nine glass sample surfaces with SEM. From these images, it was determined that the glass samples were produced by free-blowing, cylinder-blowing or mold-blowing techniques. Although low amounts of  $\text{SiO}_2$  were determined in both analysis methods, the glasses were determined to be a typical silica-soda-lime glass. At the same time, it was determined that soda-rich minerals (natron, sodium carbonate, etc.) were used as fluxes and the same raw material was used in the production of glasses. In addition, it was determined that the substance that gave color to the analyzed glass samples was  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  ions.

**Keywords:** Nysa Ancient Glasses, Archaeometry, Characterization, PED-XRF, SEM-EDX.



## GİRİŞ

Anadolu'daki cam üretiminin tarihçesi, yapısal özellikleri, yapım teknolojisi ve üretim merkezleri oldukça az bilinmektedir. Bunun nedeni de bu konudaki sistematik çalışmaların azlığıdır. Bugüne kadar gerçekleştirilen sınırlı sayıda çalışmada cam buluntular görsel özellikleri üzerinden arkeoloji ve sanat tarihi yönleri ile incelenebilmiştir.<sup>1</sup> Anadolu'daki cam buluntuların yapım teknolojisinin anlaşılması, hammadde kaynaklarının belirlenmesi ve kimyasal içeriğinin tanımlanması amacıyla arkeometrik yönden ele alınması gerekmektedir.<sup>2</sup> Son yıllarda Roma, Bizans ve Osmanlı dönemlerine ait camlar arkeometrik yönden ele alınmaya başlanmıştır.<sup>3</sup> Uygulanan yöntemlerle arkeolojik ve tarihi camların hem üretim teknolojileri hem de kimyasal yapıları ve hammadde kaynakları hakkında bilgilere ulaşılmaya çalışılmaktadır.

Cam nesnelerin bozulmaları üzerine yapılan çalışmaların azlığının yanı sıra, camın hammaddesi ve çeşitliliği üzerine yapılan çalışmalar da oldukça sınırlıdır. Aynı döneme ait Levant ve Mısır camları çok iyi araştırılmışken, Anadolu camları ile bağlantıları kurulamamıştır. Bunun nedeni ise Türkiye'deki arkeolojik

<sup>1</sup> Akyol – Kadıoğlu 2015, 29; Bakırcı 1985, 61-67.

<sup>2</sup> Aydın et al. 2015, 1; Akyol – Kadıoğlu 2015, 29.

<sup>3</sup> Akyol et al. 2009; Akyol et al. 2012; Beşer et al. 2010; Rasmussen 2012.

kazılardaki işliklerin, arkeolojik buluntuların ve arkeometrik çalışmaların henüz bu konuya tam olarak hizmet edememesidir.<sup>4</sup>

Tüm malzemelerde olduğu gibi cam malzemelerde de bazı bozulmalar görülebilmektedir. Cam harmanının iyi karıştırılmadığında camda kırılma, çatlama ve leke oluşumu gibi bozulmalar gözlenebilmektedir.<sup>5</sup> Antik camların üretildiği andan bulunduğu ana kadar geçen süreçte bozulmalar meydana gelmektedir ve bu bozulmalar üç evrede incelenebilmektedir. Birinci evrede yani camın üretildiği andan itibaren maruz kaldığı bazı nedenlerden dolayı cam nesnelere bozulmaya açık hale gelir. Camı oluşturan maddeler ve bu maddelerin oranları, ergime derecesi, fırın sıcaklığı ve fırın içerisinde kaldığı zaman bozulmada etkili olabilmektedir. İkinci evre olan toprak altında kaldığı süreçte bulunduğu toprağın yapısı, ortamdaki su, sıcaklık ve bağıl nem seviyesi, ortamdaki tuz ve/veya asitlerin varlığı, mikroorganizmaların varlığı, basınç, pH, vb. etmenler bozulmaya neden olabilmektedir. Üçüncü evre olan ve camın toprak altından çıkarıldıktan sonra başlayan süreçte ise gerekli önleyici koruma müdahalelerinin yapılmaması ve hatalı koruma ve onarım uygulamaları bozulmaya neden olan başka bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bozulma türlerinden biri veya daha fazlası bozulma mekanizmasının hızını ve türünü değiştirebilmektedir. Cam malzemelerde görülen yüzey bozulmaları seddef oluşumu, matlaşma, süt beyazı/mine aşınma, çukur oluşumu ve yarık oluşumu olarak sınıflandırılabilir.<sup>6</sup>

Boncuk ve bilezik gibi küçük cam objeler yapma yeteneğinin dünyanın bazı bölgelerinde MÖ 3000 yıldan beri var olduğu bilinmektedir, ancak MÖ 2. binyılda cam üretilmeye başlanmıştır.<sup>7</sup> Cam yapımının ilk olarak nasıl keşfedildiği kesin olarak söylenemez.<sup>8</sup> Cam genellikle işlevsel nedenlerden ziyade dekoratif amaçlar için kullanılmış ve çoğu zaman değerli taşların yerine geçmiştir. Camdan *yapay lapis lazuli* olarak bahseden eski Mezopotamya çivi yazısının kayıtları bulunmaktadır.<sup>9</sup> Cam yapımıyla ilgili yaygın bir teori olarak hammaddenin Orta Doğu'daki birincil atölyelerde veya merkezlerde üretildiği ve daha sonra Akdeniz'in diğer bölgelerine ve Avrupa'nın başka yerlerine ticaretinin yapıldığı yönündedir. Bu camlar, daha sonra çeşitli cam nesnelere oluşturmak için ikincil atölyelerde de kullanılabilir.<sup>10</sup> Filistin'de bulunan ve büyük ölçekli birincil cam üretimi için kullanılmış olabilecek bir dizi fırının kalıntıları bu söyleyi desteklemektedir. Ayrıca, Levant'ın önemli bir cam kaynağı olduğundan bahseden antik coğrafyacı Strabon (MÖ 64) ve Romalı filozof Plinius (MS 23) gibi antik yazarların belgelenmiş kaynakları da bulunmaktadır.<sup>11</sup>

<sup>4</sup> Akyol – Kadioğlu 2015, 29; Bakırer 1985, 61-67.

<sup>5</sup> Baykan 2014, 52.

<sup>6</sup> Büyüksöy 2020, 2.

<sup>7</sup> Henderson 2000, 52.

<sup>8</sup> Luckner 1994, 79.

<sup>9</sup> Henderson 2013, 9-10.

<sup>10</sup> Huisman et al. 2009, 414.

<sup>11</sup> Freestone 2009, 77; Huisman et al. 2009, 414.

Hammaddelerin ve özellikle cam örneklerdeki iz elementlerin analizi yoluyla, camın hangi kaynaktan üretilmiş olabileceği konusunda daha fazla bilgi edinelebilmektedir. Çünkü bu faktör coğrafya ve jeolojiye göre değişmektedir. Antik camın en karmaşık ve ustalıklı işlenmiş örneklerinden bazıları Mısırlılar tarafından yapılmıştır ve bu teknoloji muhtemelen Suriye'den Mısır'a getirilmiş olmalıdır.<sup>12</sup> Mısırlılar tarafından cam üretiminde kullanılan kumun yüksek bir demir içeriğine sahip olduğu bilinmektedir ve alkali kaynağı büyük ihtimalle ülkede bol miktarda bulunan natrondan ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) gelmektedir.<sup>13</sup> Kısmen reaktif olan karbonatlar ve klorürler içeren natron veya trona ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ve diğer sodaca zengin mineraller, büyük evaporitik göllerden toplanmış ve antik çağda cam üretiminde kullanılmıştır. Plinius'a göre Romalılar, MÖ 1000 ve MS 1000 tarihleri arasında natronu tercihen *Mısır sodası* olarak yaygın şekilde kullanmışlardır. Bu dönemde Yakın Doğu'nun en önemli kaynağı olan Wadi Natrun'dan natron temin edilmiştir.<sup>14</sup> Natron bileşimi aynı bölgede bile değişkenlik gösterebilse de esas olarak karbonatlar, bikarbonatlar, sülfatlar ve klorürler gibi sodyum bileşiklerinden oluşmaktadır.<sup>15</sup>

Yüksek kaliteli cam üreten ve cam yapımına büyük katkı sağlayan bir diğer tarih öncesi uygarlık Roma İmparatorluğu'dur. Roma dünyası muhtemelen MÖ 63'ten başlayarak Suriye ve Mısır'ın fetihlerinden sonra camla tanışmıştır.<sup>16</sup> Hızlı ve ucuz cam üfleme yöntemini MÖ 50 dolaylarında geliştirenler de Romalılar olmuştur.<sup>17</sup>

Antik çağda yapay cam; silika, kireç ve bir alkali olmak üzere üç gerekli bileşenden oluşmaktadır.<sup>18</sup> Bu camlar silis-soda-kireç camları olarak adlandırılmaktadır. Bilimsel bir bakış açısından, antik camın bileşimi tipik olarak yaklaşık %73  $\text{SiO}_2$ , %22  $\text{Na}_2\text{O}$  ve %5  $\text{CaO}$  element bileşimine sahip bir soda-kireç camıdır.<sup>19</sup> Ek olarak cam, kasıtlı veya kasıtsız olarak çeşitli renklendirici maddeler veya opaklaştırıcılar içerebilir. Bazen toplam erime noktasını düşürmek için kırık cam parçaları da eklenmiştir.<sup>20</sup> Bu bileşenler 1300-1500°C arasında ısıtıldığında camı oluşturur. Partideki en yüksek miktara sahip olan silika, kumun, ezilmiş kuvarsın veya ezilmiş çakmaktaşının ana bileşenidir. Eski cam yapımcıları kumu deniz kıyısından veya nehir yataklarından tedarik etmişlerdir.<sup>21</sup>

<sup>12</sup> Tait 1991, 26.

<sup>13</sup> Lambert 1997, 110; Henderson 2000, 26.

<sup>14</sup> Verità et al. 2002.

<sup>15</sup> Jackson et al. 2016.

<sup>16</sup> Lambert 1997, 110.

<sup>17</sup> Renfrew - Bahn 2004, 345.

<sup>18</sup> Goffer 2007, 124; Wight 2011.

<sup>19</sup> Aerts et al. 1999; Arletti et al. 2006; Degryse - Schneider 2008; Fermo et al. 2016; Foster - Jackson 2009; Goffer 2007; Gratuze - Janssens 2004, 665; Sayre - Smith 1961; Silvestri et al. 2005; Verità 2004.

<sup>20</sup> Goffer 2007, 124.

<sup>21</sup> Wight 2011.

Cam, birkaç nedenden dolayı işçiliği zor bir malzeme olarak bilinir. Birincisi, ihtiyaç duyduğu ana hammadde olan kum, kaynağın topografik bölgesine bağlı olarak çok farklı ve değişen miktarlarda mineral ve kaya parçacıklarından oluşabilmektedir.<sup>22</sup> Farklı kaynaklardan gelen camların birbirine eklenmesi ve karışıma eklenen cam kırıntısı olarak bilinen herhangi bir renklendirici veya kırık camın etkisinin de işlemi daha da karmaşık hale getirme olasılığı bulunmaktadır.<sup>23</sup> Herhangi bir cam örnekte, tüm bu potansiyel değişkenler kaynağının bulunmasının zor olduğunu gösterir. Diğer bir neden de, erimiş camın genellikle içinde bulunduğu herhangi bir kabı kısmen akıtarak daha fazla safsızlık getirebilmesidir.<sup>24</sup>

Antik cam örnekleri üzerinde çok sayıda arkeometrik çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalar hem cam örneklerinin üretim teknolojisini tespit etmede yardımcı olurken hem de kullanılan hammaddelerin ve olası cam üretim merkezlerinin hangi bölgelerde yapıldığını anlamamıza olanak sağlamaktadır.<sup>25</sup>

Camların kimyasal yapısı X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) yöntemiyle aydınlatılabilmektedir.<sup>26</sup> XRF analizi, söz konusu malzemedeki atomların bir birincil X-ışınları demeti ile iyonlaşmasına dayanan kalitatif ve kantitatif analiz yöntemidir. Malzeme tarafından yayılan karakteristik radyasyonu analiz ederek, mevcut elementlerin varlığını ve miktarını sayısal olarak belirlemek mümkündür.<sup>27</sup> Yalnızca kum ve eritici maddeler gibi ana hammaddeleri değil, aynı zamanda renklendirici ve opaklaştırıcı gibi katkı maddelerini de tanımlamak için kullanılabilir. Bu da cam üretiminde kullanılan teknoloji hakkında bilgi sağlayabilmektedir.<sup>28</sup> XRF cihazının farklı konfigürasyonlarından biri de Polarize Enerji Dağılımlı X-ışını Floresansı (PED-XRF)'dir.<sup>29</sup> Polarize X-ışını radyasyonunda, örnek doğrusal polarize X-ışını ile uyarılır ve örnekten sadece floresans radyasyonu yayılır, örnekten herhangi bir birincil radyasyon saçılmaz. Floresans radyasyonu, dedektöre uygun pozisyonda ulaşır. PED-XRF yönteminde ışın, saçılımlı ışın ve floresans ışın, birbirleriyle dik açılarda tasarlanmıştır.<sup>30</sup> Polarize ışın, örneğin yapısındaki elementlerin karakteristik X-ışınlarını uyarmak, örnekten saçılmayı azaltmak için kullanılır. Polarize olmayan radyasyonun aksine, spektral arka plan oldukça düşüktür. PED-XRF çok elementli analiz kabiliyetini düşük tespit limitleri

<sup>22</sup> Wilson - Pollard 2005, 513.

<sup>23</sup> Pollard - Heron 2008, 183.

<sup>24</sup> Wilson - Pollard 2005, 513

<sup>25</sup> Brems - Degryse 2014; Degryse v Schneider 2008; Freestone et al. 2000; Freestone 2003; Freestone et al. 2003; Ganio et al. 2012; Henderson et al. 2010; Jackson 2005; Nenna 2014; Paynter 2006; Schibille et al. 2017; Wedepohl - Baumann 2000.

<sup>26</sup> Johnson et al. 1999; La Tour 1989; Pollard - Heron 1996; Shackley 2011.

<sup>27</sup> Janssens 2004, 129.

<sup>28</sup> Stuart 2007, 238.

<sup>29</sup> Lipták 2003, 1345; Mantler - Schreiner 2000, 3-4.

<sup>30</sup> Stephens - Calder 2004, 90-95.

ve minimum örnek hazırlığı ile birleştirmektedir.<sup>31</sup> Antik camların PED-XRF ile analiz edilmesine dair literatürde birden fazla çalışma raporlanmıştır.<sup>32</sup>

SEM-EDX hafif elementler içeren iletken olmayan malzemenin kantitatif mikro analizini yapabilmesi nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Yöntem, yaklaşık % 0,1'den daha yüksek derişimlerde camdaki elementlerin sodyuma kadar yarı kantitatif analizine izin vermektedir. Genellikle, temel ve az elementlerin belirlenmesi için SEM-EDX kullanılabilir, ancak eser elementleri belirlemek için çalışmanın daha hassas bir yöntem ile desteklenmesine ihtiyaç vardır.<sup>33</sup> SEM-EDX yöntemi kullanılarak antik cam örnekler üzerine rapor edilmiş birçok çalışma bulunmaktadır<sup>34</sup> ve bu yöntem halen en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir.

## NYSA ANTİK KENTİ VE CAM ÖRNEKLEMELERİ

Nysa Antik Kenti, Aydın ilinin 30 km doğusundaki Sultanhisar ilçesinin yaklaşık 3 km kuzeyinde yer almaktadır. Kentte yürütülen kazı ve araştırma çalışmaları sonucunda kentin Hellenistik, Roma ve Bizans dönemlerinde yerleşim gördüğü tespit edilmiştir.

Nysa, Mesogis (Aydın-Cevizli) Dağı'nın güney yamacında, Meandros (Menderes) Nehri'nin kuzeyinde yer almaktadır (Fig. 1, 2). Dağlardan gelen sel sularının oluşturduğu derin bir vadi üzerine kurulmuş olan kent, vadinin iki yakasına yayılmaktadır. Doğu ve batı yakadaki yerleşim alanları arasındaki bağlantıyı Roma İmparatorluk Dönemi'ne ait üç adet köprü sağlamaktadır. Karia Bölgesi'nde, Asia Eyaleti'nin önemli kentleri arasında sayılan Nysa ad Maeandrum'u döneminin ünlü coğrafyacısı Strabon (MÖ 64 – MS 24) Geographika-Coğrafya adlı eserinde çift yakalı kent olarak tanımlamaktadır. Kentin tarihçesi, yapıları ve Nysa Gymnasium'unda eğitim veren ünlü kişileri sayarken Strabon, kendisinin de gençken Aristodemos'un tüm derslerine Nysada devam ettiğinden söz etmedir.<sup>35</sup>

<sup>31</sup> Kramar 1999

<sup>32</sup> Akyol et al. 2009; Akyol et al. 2012; Akyol et al. 2014; Akyol – Kadioğlu 2015; Akyol-Erten 2016; Akyol – Kadioğlu 2017; Akyol – Kadioğlu 2021; Akyol et al. 2021; Büyüksoy et al. 2021; Büyüksoy et al. 2023; Akyol – Koçak 2024.

<sup>33</sup> Wagner et al. 2008, 416-421.

<sup>34</sup> Aydın et al. 2015, 2; Knappet et al. 2011, 219-232; Kursula 2000, 111-118; Shortland – Eremin 2006, 581-603.

<sup>35</sup> Diler – Öztaner 2021, 185.



**Fig. 1:** Nysa antik kentinin bugünkü Türkiye sınırları içinde konumu<sup>36</sup>



**Fig. 2:** Nysa antik kentinin kuşbakışı görünümü.<sup>37</sup>

Antik dönemde yoğun olarak kullanılan önemli bir ana yol, Anadolu'nun iç bölgelerinden gelerek Nysadan geçmekte ve buradan Karia ve İonia Bölgeleri'nin diğer kentlerine ulaşmaktadır. Dolayısıyla kent önemli ulaşım ve ticaret yolları üzerinde bulunmaktadır.<sup>38</sup>

Antik kentte gerçekleştirilen kazı ve araştırma çalışmaları sonucunda, kalıntıları açığa çıkarılan yapıların tamamına yakını Roma ve Geç Roma Dönemi'ne ait-

<sup>36</sup> <https://www.haberlerturkiye.com.tr/turkiye-haritasi-siyasi-renkli-turkiye-nin-illeri-haritasi-sehir-isimleri-listesi/37267/>.

<sup>37</sup> Diler - Öztaner 2021, 186.

<sup>38</sup> Öztaner 2022, 230.



tir. Kentin kuruluş dönemine ait Hellenistik Dönem yapıları, kentte ağırlıklı olarak görülen Roma ve Geç Roma Dönemi mimarisinin altında kalmıştır. Geç Roma ve Bizans Dönemleri'nden MS 13. yüzyıla kadar, kentte yaşamın devam ettiği ortaya çıkarılan kalıntılardan anlaşılmaktadır. MS 13. ve 14. yüzyıllarda Aydın Bölgesi'ne Selçuklular ve Anadolu Beylikleri'nden Menteşe ve Aydınogulları Beylikleri hâkim olmuş, 15. yüzyıldan itibaren ise Nysa terk edilerek, güneyindeki günümüz modern yerleşimi olan Sultanhisar'da yaşanmaya başlanmıştır.<sup>39</sup>

Nysa antik kenti, 20. yüzyılın başlarında birçok araştırmacının ilgisini çekmiş bir kent olmuştur. Alman Walther Von Diest 1907 ve 1909 yılları arasında, arkeolog ve haritacıardan oluşan bir ekiple Nysa'da kazı ve araştırma çalışmalarını sürdürmüş, ardından 1921 yılında Yunanlar tarafından alanda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İzmir Arkeoloji Müzesi, 1960'larda Gerontikon ve Tiyatro'da kazı çalışmaları yürütmüş, Aydın Arkeoloji Müzesi de 1980'li yıllarda Tiyatro'nun sahne binasında kısa süreli çalışmalar gerçekleştirmiştir. 1990 – 2010 yılları arasında, Nysa'daki araştırma, kazı ve restorasyon çalışmaları, Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Arkeoloji Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Vedat İdil'in başkanlığını, Prof. Dr. Musa Kadioğlu'nun başkan yardımcılığını yürüttüğü ekip tarafından gerçekleştirilmiştir. 2012 yılından itibaren ise çalışmalar Aydın Arkeoloji Müzesi başkanlığında, Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Arkeoloji Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Serdar Hakan Öztaner'in bilimsel danışmanlığında gerçekleştirilmektedir.

2007-2008 yıllarında yapılan arkeolojik kazılarda Nysa'daki başlıca yapı kalıntıları arasında yer alan agoranın kuzey portikosundaki alanın, sonradan basit duvarlarla yan yana 4 ayrı mekâna ayrıldığı belirlenmiştir.<sup>40</sup> Bu mekânlardan ele geçen arkeolojik buluntular ve mimari kalıntılar, mekânların ışık ve depolama alanları olarak kullanıldığını göstermektedir. 1. ve 3. mekânlarda yapılan kazılarla belirlenen taş döşemeli tabanın üzerinde, yoğun miktarda pencere camı parçaları ile çeşitli formlarda yapılmış cam kâse, ayaklı kadeh ve kandil parçaları bulunmuştur. Bu mekânlarda bulunan cam çekirdek parçası ve cam cürufalarının yanı sıra her iki mekânda da dörtgen formlu ve ocak kalıntılarının varlığı bu iki mekânın cam üretiminde kullanıldığına dair önemli verileri oluşturmaktadır. Cam kaplara ait parçalar (Fig. 3a) ile yine aynı tabakadan bulunan Geç Roma Dönemi'ne tarihlenen pişmiş topraktan günlük kullanım kapları ile *sigillata* örnekleri ve Geç Roma Dönemi *unguentarium*'larına ait parçalar (Fig. 3b) ile bu mekânların yaklaşık olarak MS 6-7. yüzyıllarda cam işliği olarak kullanıldığını göstermektedir (Fig. 3c, d).<sup>41</sup>

<sup>39</sup> İdil – Kadioğlu 2009, 500-501; İdil et al. 2010, 271-272.

<sup>40</sup> İdil – Kadioğlu 2009, 502-503; İdil et al. 2010, 272.

<sup>41</sup> İdil et al. 2010, 272-273.

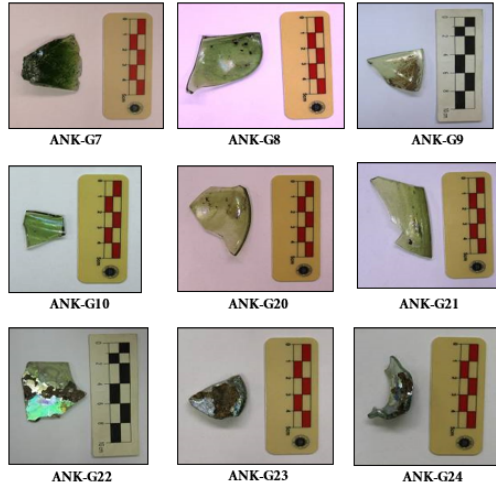


**Fig. 3:** Nysa antik kenti (a) cam buluntuları, (b) Geç Roma Dönemi pişmiş toprak buluntularından *unguentarium*'lar, (c) ve (d) cam buluntu yerleri (Agora 4. dükkân).

## MALZEMELER VE YÖNTEMLER

### Cam Örnekler

Nysa antik kenti kazısından etütlük olarak ayrılmış 9 adet cam örnek (Fig. 4) üzerinde arkeometrik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Çalışma boyunca örnekler öncelikle görsel olarak değerlendirilmiş, fotoğraflanarak belgelenmiş ve her bir örnek ayrı ayrı kodlanmıştır. Ayrıca, cam örneklerin kalınlıkları bir dijital kalınlık ölçer kullanılarak belirlenmiştir (Tablo 1).



**Fig. 4:** Nysa antik kenti cam örnekleri.

**Tablo 1.** Nysa antik kenti cam örneklerinin özellikleri, kalınlıkları ve renk değerleri.

Örnekler	Açıklamalar	Lokasyon	Örnek Formu	Kalınlık (mm)	Görünen Renk	Renk Koordinatları		
						L*	a*	b*
ANK-G7	Chunk glass	Agora 4. dükkân	Üretim	amorf	koyu yeşil	13,08	-13,09	13,56
ANK-G8	-		Form	3,52	yeşil	52,30	-22,72	34,56
ANK-G9	-		Form	2,52	sarı-yeşil	71,50	-11,58	24,52
ANK-G10	Gövdesi kaburgalı parça		Form	3,53	yeşil	53,58	-24,27	34,04
ANK-G20	Kase parçası		Form	2,00	yeşil	69,49	-14,08	21,66
ANK-G21	Yuvarlatılmış ağızlı parça		Form	3,42	yeşil	65,85	-15,71	21,43
ANK-G22	-		Form	3,47	yeşil	74,82	-16,85	20,43
ANK-G23	Tüp biçimli halka kaide		Form	5,78	yeşil	66,59	-20,33	26,17
ANK-G24	Üretim artığı		Üretim	amorf	yeşil	70,06	-18,22	13,60

## Renk Ölçümü

Renk analizleri, standart CIEL\*a\*b\* (Commission Internationale de L'Eclairage) renk sistemi kullanılarak yapılmıştır. CIEL\*a\*b\* renk uzayına göre; 0 ile 100 değerleri arasında değişen (L\*) değeri rengin açıklık/koyuluk değerini (beyaz: 0 ve siyah: 100), (+a\*) değeri renkteki kırmızı yoğunluğunu, (-a\*) değeri rengin yeşil yoğunluğunu, (+b\*) değeri rengin sarı yoğunluğunu ve (-b\*) değeri de rengin mavi yoğunluğunu göstermektedir<sup>42</sup> (Tablo 1). Bu çalışma için Pro System III yazılıma sahip ColorQA PocketSPEC CIEL\*a\*b\* spektrofotometresi kullanılmıştır.

## SEM-EDX

SEM-EDX yardımıyla yapılan görüntüleme ve elementel analizler ile bu analizler için örnek hazırlama süreci Turkish Cultural Foundation (TCF), Cultural Heritage Preservation and Natural Dyes Laboratory (DATU Laboratuvarı)'nda gerçekleştirilmiştir.

<sup>42</sup> Ohno 2007, 101-132.

## Örnek Hazırlama

SEM-EDX ile analizler 15 ve 20 keV enerji seviyelerinde ve yüksek vakum altında gerçekleştirilmiştir. Yüksek vakum altında çalışılacağı için cam numuneler analiz sonucunu etkilemeyecek şekilde karbon bir banda yapıştırılarak numune tutucuya sabitlendirilmiştir. Cam örneklerin yüzeylerinden görüntülerin yüksek çözünürlükte elde edilebilmeleri için tüm örnekler karbon ile kaplanmış ve görüntüler ikincil elektron (SE) dedektör kullanılarak elde edilmiştir. Örnekler üzerindeki karbon kaplamanın elementel analiz sonucuna etki etmemesi için karbon elementi tüm analiz sonuçlarından ihmal edilmiştir (Tablo 2).

## Cihaz Donanımı

Bu çalışmada, TESCAN VEGA3 SBU Easy probe markalı, Bruker X-Flash 410-M dedektör uyumlu (Yazılım: Esprit 1.9) EDX dedektör ile BSE ve SE dedektörlere sahip bir taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDX) kullanılmıştır. Ayrıca elektron kaynağı olarak termiyonik emisyonlu tungsten lambalı bir filaman kullanılmıştır. EDX dedektörü sayesinde elementel analizler atomik ve ağırlıkça yüzde olarak yarı kantitatif olarak elde edilmiştir. Kalitatif mikroanaliz, çok elementli bir malzeme-deki her bir elementin konsantrasyonunun eşzamanlı olarak belirlenmesine olanak tanıyan ve matriks etkisinin düzeltilmesine dayanan ZAF yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, sırasıyla elektron penetrasyonunun bileşimi ve derinliği tarafından üretilen X-ışını yoğunluğu düzeltmesini, absorpsiyon düzeltmesini, floresans düzeltmesini ve ikincil floresans yoluyla her bir elementin atom numarası etkisini sağlamaktadır.

## PED-XRF

PED-XRF yardımıyla yapılan elementel analizler ve bu analizler için örnek hazırlama süreci Ankara Üniversitesi, Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM)'nde gerçekleştirilmiştir.

## Örnek Hazırlama

Analiz için en az 1,5-3,0 g ağırlığa sahip etütlük cam örnekler agat havan kullanılarak toz haline getirilmiştir. Toz halindeki örnekler 32 mm'lik disk peletler haline getirilmiştir. Daha sonra her bir disk XRF analizinde kullanılan reçine ile karıştırılarak PED-XRF'in örnek bölgesine yerleştirilmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Analizde USGS (United States Geological Survey) standartları kullanılmış ve GEOL, GBW-7109 ve GBW-7309 referans alınmıştır.

## Cihaz Donanımı

Bu çalışmada, X-LAB 2000 model PED-XRF spektrometresi kullanılmıştır. PED-XRF yıkıcı bir analiz yöntemi olmakla birlikte bilgilendirici bir analiz tekniğidir. X-Lab 2000 PED-XRF spektrometresi atom numarası 11 olan sodyumdan (Na), 92 olan uranyuma (U) kadar olan elementleri analiz edebilme özelliğine sahiptir. Cihazın duyarlık sınırı ağır elementlerde 0,5 ppm ve hafif elementlerde ise 10 ppm kadardır. PED-XRF analizi, yüksek sıcaklıklarda (950°C) ağırlık kaybına bağlı olarak kaybolan bor, lityum ve flor dışında, incelenen cam örnekleri karakterize eden tüm kimyasal bileşenlerin belirlenmesine olanak sağlamıştır.

## BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Nysa antik kentinde yapılan kazılar sırasında ele geçen cam örnekler arkeometrik yönden incelenmiştir. Bu çalışmada, fiziksel olarak incelemede CIEL\*a\*b\* spektrofotometresi ve kalınlık ölçerden faydalanılırken, kimyasal analizler için X-ray spektroskopisi yöntemlerinden SEM-EDX ve PED-XRF yöntemleri kullanılmıştır.

### Renk Ölçüm Sonuçları

İnsan gözü rengi tam olarak ölçemez, ancak renk tonları arasındaki farklılıkları belirler. Bu farklılıkları renk ismi olarak ifade etmek öznel, ancak numuneler arasında renk farklarının değerlerle ifade edilmesi<sup>43</sup> tüm renkli malzemelerde olduğu gibi cam malzemelerde de oldukça önemlidir. Bulunan antik cam örnekleri tekstil, kâğıt veya diğer bazı malzemeler gibi düz olmadığından ve saydam yapıda olduğundan ölçüm yaparken (cihazın konfigürasyonundan dolayı) renk kaybı yaşanabilir, ancak çok sayıda cam örneklerin renk değerlerini karşılaştırmak için renk ölçüm sonuçları gerekli ve önemlidir. Renk ölçüm sonuçları ile insan gözünün gördüğü çoğu renk birbirleriyle uyumludur.

Bu çalışmada, cam örneklerin renkleri kromametrik olarak analiz edilmiş ve renk değerlerinden örneklerin yeşil renk ve tonlarına sahip olduğu belgelenmiştir (Tablo 1). Renk ölçümünde parlaklığın veya renk açıklığının ifadesi olan L\* değeri, renk koyulaştıkça azalmakta, açıldıkça yükselmektedir. Örnekler içinde en koyu renkli olan ANK-G7 örneğinin L\* değeri diğer tüm örneklerden daha düşük değerde bulunmuştur. (-a\*) değeri yeşil rengi ifade etmekte olup, tüm örneklerin a\* değeri incelendiğinde negatif (-) değerde olduğu tespit edilmiştir (Tablo 1). Cam örneklerine ait temel renk değerlerinin (L\*, a\* ve b\*) karşılaştırılabilmesi için Fig. 5 grafiği oluşturulmuştur.

<sup>43</sup> <https://www.blabmarket.com/blog/icerik/renk-olcumu-nedir-kolorimetre-nasilcalisir?srsstid=AfmBOoq0Wo-ZOxQJLCEV9ImiE819ZY6Qktj2dEjyBQ6BYFdPpkewKE-b>

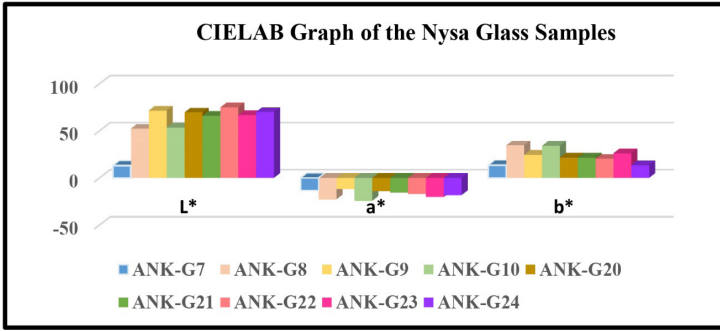
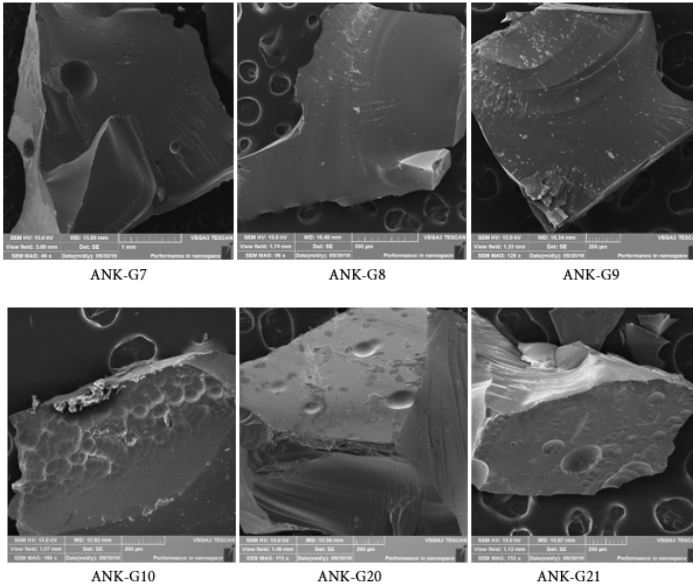
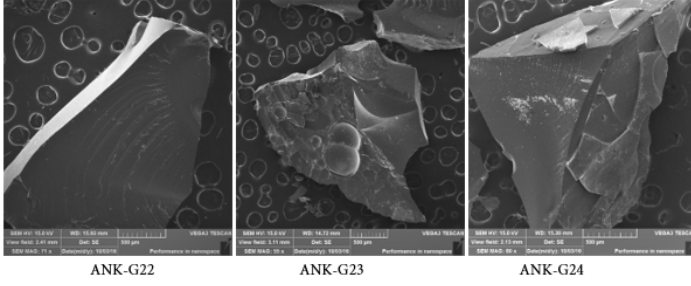


Fig. 5: Cam örneklere ait renk değerlerine ait grafik.

### SEM-EDX SONUÇLARI

SEM-EDX yöntemi kullanılarak cam **örnek**lerin hem SEM altında üretim yöntemleri hem de elementel analizler gerçekleştirilerek kimyasal kompozisyonu belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre, SEM ile farklı büyüklüklerde elde edilen görseller Fig. 6'da gösterilmiştir.





**Fig. 6:** Cam örneklerine ait SEM görüntüleri.

Fig. 6'da elde edilen SEM görüntülerine göre ANK-G7, ANK-G10, ANK-G20, ANK-G21 ve ANK-G23 örneklerinde iri habbeli yapılar tespit edilmiştir. Bu sonuç da bu örneklerin üretimlerinde serbest üfleme, silindir üfleme ya da döküm teknikleri uygulanmış olduğunu göstermektedir.

Camın bileşiminde cam oluşturuca olarak bulunan ve ana malzeme olan  $\text{SiO}_2$  miktarının yüksek olması, camın mekanik direncinin ve dayanıklılığının yüksek olduğunu, aynı zamanda camın erime noktasının da yüksek olduğunu göstermektedir.  $\text{SiO}_2$  ile birlikte cama sağlamaştırıcı etki olarak eklenen CaO miktarının mevcut üretim oranlarından daha az olması camın dayanıklılığını azaltmakta ve bozulmaya karşı direncini düşürmektedir<sup>44</sup>. Tablo 2'de SEM-EDX ile elde edilen sonuçlara göre, camı oluşturan temel unsur olan  $\text{SiO}_2$  miktarı % 59,30-% 65,25 arasında değişiklik göstermekte olup, ortalama bu değer % 62,48'dir. Tipik bir silis-soda-kireç camı ile karşılaştırıldığında bu oran düşüktür. Bu sonuç da camların yapısında bir bozulma olduğuna işaret etmektedir.

<sup>44</sup> Akyol et al. 2014, 16-17.

**Tablo 2.** Nysa antik kenti cam örneklerinin SEM-EDX analizi sonuçları.

ELEMENT OKSİT YÜZDELERİ	ANK-G7	ANK-G8	ANK-G9	ANK-G10	ANK-G20	ANK-G21	ANK-G22	ANK-G23	ANK-G24	Ortalama
Na <sub>2</sub> O	21,51	19,97	24,44	21,32	23,80	16,93	23,91	25,11	23,61	22,29
MgO	1,39	1,30	1,31	1,93	1,28	1,25	1,04	1,27	1,22	1,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,94	3,00	3,73	3,80	3,77	3,31	2,94	3,09	3,25	3,31
SiO <sub>2</sub>	64,17	65,25	61,30	62,19	61,39	62,99	62,87	59,30	62,83	62,48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	-	0,10	0,20	0,10	-	0,11	0,05	-	0,07
SO <sub>3</sub>	0,19	0,10	0,50	0,27	0,36	0,27	0,24	0,39	0,13	0,27
Cl	0,88	0,85	0,76	1,13	0,72	1,13	1,16	1,10	1,31	1,00
K <sub>2</sub> O	0,31	0,33	0,34	0,44	0,43	0,49	0,24	0,33	0,26	0,35
CaO	5,83	6,08	4,43	5,64	4,88	7,72	5,93	6,37	5,47	5,82
TiO <sub>2</sub>	0,21	0,24	0,22	0,35	0,27	0,59	0,06	0,09	0,14	0,24
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	-	-	-	0,03	0,22	-	-	-	0,03
MnO	1,50	1,76	1,72	1,75	1,92	2,44	0,75	0,94	0,98	1,53
FeO	0,92	1,04	0,86	0,89	0,91	1,15	0,69	1,50	0,82	0,98
Co	-	-	0,03	0,02	-	0,25	-	-	-	0,10
Cu	-	-	0,09	0,03	0,08	0,17	-	-	-	0,04

Ca, Mg ve Al gibi dengeleyici ve dayanım arttırıcı elementlerin eklenmesi cama sağlamlık kazandırmaktadır. Al ilavesi, camın şekillendirme ve biçimlendirme sırasında çalışma özelliklerini arttırmaktadır<sup>45</sup>. Bu nedenle, toprak alkali kanyonlar camı daha güçlü, daha dayanıklı ve nispeten çözünmez hale getirmektedir. Antik çağlarda kalsiyum, kumdaki küçük kabuk parçaları olarak silika kaynağındaki safsızlıklar veya kireç taşından elde edilen kalsiyum içeren bitkiler olarak soda kaynağının kalıntıları cama istenmeden eklenmiştir<sup>46</sup>. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> olarak da bilinen soda, yüksek sıcaklıklarda CO<sub>2</sub> salarak ayrışır ve Na<sub>2</sub>O oluşturur. Antik camda en yaygın ikinci maddedir ve camın havalandırılmaması durumunda soda içeriği % 15-23 civarındadır<sup>47</sup>. Tablo 2'de cam örneklerde Na<sub>2</sub>O miktarları incelendiğinde en düşük oranın % 16,93, en yüksek oranın ise % 25,11 olduğu tespit edilmiştir ve bu sonuçlar dokuz örnek için ortalama % 22,29 değerindedir. Bu durum ergitici alkali olarak natron, soda veya sodyumca zengin başka bir mineralin kullanıldığını göstermektedir. Özellikle bölgenin jeolojik yapısı gereği, seramik sanayinin de ana hammaddesi olan albit bileşimli (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) feldispatların cam üretiminde kullanılmış olması kuvvetle muhtemeldir. Albit bileşimli feldispatların kullanılmış olması kimyasal analiz sonuçlarında da belirlenen Na ve Al değerlerinde görülen yüksekliği de açıklayabilmektedir.

<sup>45</sup> Goffer 2007, 117-120.

<sup>46</sup> Whitehouse 2012, 9-120.

<sup>47</sup> Shortland 2012, 97-119.



Kireç ve alümina, cam yapım kumunu yansıttığı için genellikle cam gruplarını ayırmak için kullanılmaktadır<sup>48</sup>. Örneğin; Roma natron camları kumda bulunan feldspattan dolayı % 1,7-3,5 arasında alümina içermektedir<sup>49</sup>. Tablo 2'de SEM-EDX ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, MgO miktarının %1,04-%1,93 aralığında ve ortalamanın % 1,33 oranında olduğu görülmektedir. MS 1. ila 6. yy, bitki külü esas olarak Mezopotamya'da cam yapımında hammadde olarak kullanılmış, Roma ve Geç Antik cam buluntularının arkeometrik çalışmalarında ara sıra rapor edilmiştir<sup>50</sup>.

Cam üretiminde dayanım arttırıcı olarak kullanılan CaO oranı Tablo 2'deki verilere göre, % 4,43-% 7,72 arasında değişen miktarlarda olup ortalama değer % 5,82'dir. Bu sonuç da göstermektedir ki tipik bir soda-kireç camı ile Nysa anti kenti cam örneklerinde bulunan üç temel bileşenin (SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O ve CaO) oranları SiO<sub>2</sub> dışında birbiri ile uyushmaktadır.

Camın üretiminde kullanılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, genellikle silis kaynağı olarak kullanılan hammaddeden ileri gelmektedir. Tablo 2'deki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranlarına bakıldığında tüm örnekler için sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da kullanılan kum ve/veya kuvarsın aynı kaynaktan olabileceğini göstermektedir<sup>51</sup>.

Camı oluşturan renk ile ilgili bileşenler Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, As, Sn, vb. geçiş metallere<sup>52</sup>. Nysa antik kenti cam örneklerinin element içerikleri incelendiğinde, özellikle Fe elementinin tüm örneklerde bulunduğu saptanmış olup, ortalama değer ise yaklaşık % 1.00 olduğu belirlenmiştir (Tablo 2). Örneklerde Fe<sup>2+</sup> iyonlarının varlığı cama sarı renk kazandırmaktadır. Çözeltide Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> oranı azaldıkça renk yeşile doğru gitmektedir. Fe<sup>3+</sup> iyonlarının varlığı cama sarı ve kırmızı renk vermektedir<sup>53</sup>. Demirin cama bilinçli olarak mı konulduğu yoksa kullanılan hammaddelerin içinde safsızlık olarak mı bulunduğu tartışma konusudur. Elde edilen bu sonuçlardan safsızlık olarak bulunmasının daha düşük bir olasılık olduğu görülmektedir.

Cama mor rengini veren ve renk giderici olarak da kullanılan Mn, SEM-EDX analiz sonuçlarına göre % 0,75 ile % 2,44 arasında bulunmuştur. Mn oranının % 0,4'ten fazla olması cam yapımı sırasında bilinçli olarak eklendiği anlamına gelmektedir<sup>54</sup>. Normalde cam renklendiriciler fırında indirgenmiş koşullarda görünür, ancak demiri oksitlemek için partiyeye Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO ve As eklenmektedir<sup>55</sup>. Jackson ve Paynter'in araştırmasına göre (2016)<sup>56</sup>, ağırlıkça % 0,6 Fe içeren yük-

<sup>48</sup> Schibille et al. 2017, 1224-1239.

<sup>49</sup> Henderson 2013, 320-325.

<sup>50</sup> Freestone 2006, 201-216; Silvestri et al. 2018, 331-341.

<sup>51</sup> Freestone et al. 2002, 257-272.

<sup>52</sup> Henderson 2000, 67.

<sup>53</sup> Bamford 1962, 189-202.

<sup>54</sup> Brill 1988, 257-294.

<sup>55</sup> Davison 2003, 1-16.

<sup>56</sup> Jackson-Paynter 2016, 68-90.

sek manganlı (% 1'den fazla) cam mavi-yeşil bir renkle sonuçlanabilir. Silvestri'ye (2008)<sup>57</sup> göre, MnO'nun Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e oranı % 2'den büyük olmadıkça Mn etkili bir şekilde renk açmaz. Bu durumda fırın atmosferi oldukça indirgeyicidir ve Mn renk giderimini engelleyen bir oksidan olarak düzgün etki göstermemektedir. Bu çalışmada, Mn ortalama % 1,53 oranında bulunmasına rağmen incelenen örnekler arasında renksiz cama rastlanmamıştır. Bu durum cam içeriğinde ortalama % 0,98 (% 0,69–1,50 arası) oranına sahip olan Fe'nin cama mavi veya yeşil tonlar vermesi ile açıklanabilmektedir.

## PED-XRF SONUÇLARI

Bu çalışmada, diğer X-ışını spektrometresi yöntemlerinden biri olan PED-XRF ile çalışılmış ve cam örneklerin elementel analizi gerçekleştirilmiştir. Buna göre, ağırlıkça yüzde olarak tespit edilen ana oksit element içerikleri Tablo 3'de, ppm seviyesinde tespit edilen iz element içerikleri ise Tablo 4'de sunulmuştur.

**Tablo 3.** Nysa antik kenti cam örneklerinde PED-XRF ile tespit edilen ana oksit element içerikleri.

Element Oksitler (%)	ANK-G7	ANK-G8	ANK-G9	ANK-G10	ANK-G20	ANK-G21	ANK-G22	ANK-G23	ANK-G24	Ortalama
SiO <sub>2</sub>	64,22	57,88	53,04	60,32	43,06	51,04	62,01	51,84	59,60	55,89
Na <sub>2</sub> O	14,92	11,24	10,76	11,66	7,59	8,59	13,10	10,13	10,73	10,97
CaO	5,90	5,41	3,82	4,41	3,54	5,19	5,07	5,45	5,08	4,87
MgO	0,937	0,733	0,468	0,891	0,267	0,671	0,583	0,407	0,670	0,625
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,974	0,685	0,820	4,89	0,490	0,737	0,851	1,02	1,73	1,36
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,049	0,015	0,002	0,011	0,002	0,002	0,027	0,065	0,050	0,025
SO <sub>3</sub>	0,197	0,128	0,282	0,088	0,180	0,092	0,175	0,205	0,108	0,162
Cl	0,974	0,838	0,582	0,864	0,464	0,678	0,963	0,721	0,890	0,775
K <sub>2</sub> O	0,536	0,556	0,548	0,459	0,582	0,424	0,519	0,580	0,727	0,548
TiO <sub>2</sub>	0,321	0,378	0,348	0,383	0,331	0,272	0,119	0,208	0,302	0,296
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,010	0,011	0,009	0,007	0,011	0,007	0,007	0,007	0,010	0,009
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,008	0,008	0,007	0,008	0,005	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005
MnO	1,70	1,77	1,83	2,07	1,78	1,93	1,02	1,26	1,20	1,619
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,32	1,31	1,19	1,42	1,26	1,26	0,89	1,44	1,30	1,27

<sup>57</sup> Silvestri et al. 2008, 331-341.

**Tablo 4.** Nysa antik kenti cam örneklerinde PED-XRF ile tespit edilen iz element içerikleri.

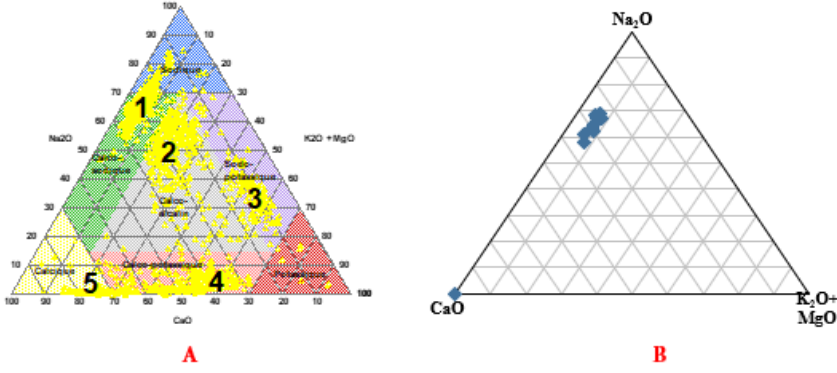
Element (ppm)	ANK-G7	ANK-G8	ANK-G9	ANK-G10	ANK-G20	ANK-G21	ANK-G22	ANK-G23	ANK-G24	Ortalama
Co	17,5	23,2	11,6	20,7	16,2	24,4	18,2	24,8	16,3	19,2
Ni	14,8	13,7	14,2	16,5	12,3	15,2	13,3	15,9	15,1	14,6
Cu	655,4	70,3	29,3	39,9	33,3	43,3	30,2	62,2	62,1	114,0
Zn	8,4	22,3	15,4	22,9	19,0	23,8	11,9	17,6	20,2	17,9
Ga	1,6	3,2	4,1	4,6	3,8	4,1	2,8	2,5	4,3	3,4
Ge	0,3	0,5	1,0	1,3	0,4	1,0	0,3	1,0	1,0	0,8
As	4,1	3,4	3,6	3,7	3,0	3,1	5,1	9,4	3,3	4,3
Se	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
Br	7,0	6,9	7,5	5,5	8,6	4,3	7,2	9,5	9,3	7,3
Rb	7,4	5,4	6,6	5,5	6,5	5,5	5,5	6,7	9,4	6,5
Sr	495,1	494,8	350,2	423,5	393,6	535,3	385,0	466,7	428,8	441,4
Y	6,9	7,1	7,9	7,3	8,9	7,3	5,9	7,5	8,7	7,5
Zr	176,0	231,1	197,9	248,1	211,3	173,5	63,1	125,9	182,3	178,8
Nb	2,5	3,0	8,4	6,5	5,4	4,3	4,0	3,0	2,8	4,4
Mo	3,4	5,9	6,0	11,5	9,0	9,7	5,2	4,6	7,4	7,0
Cd	0,8	0,9	0,9	0,8	1,2	0,9	0,7	1,0	0,9	0,9
In	1,0	0,9	0,9	0,8	1,2	0,6	0,7	1,0	0,9	0,9
Sn	33,5	10,3	0,9	1,5	1,3	1,1	0,8	6,7	2,2	6,5
Sb	79,4	7,8	1,0	3,3	1,3	1,0	0,8	31,7	1,1	14,2
Te	1,2	1,4	1,4	1,3	2,0	2,2	1,1	1,7	1,5	1,5
I	2,2	2,6	2,4	2,4	3,5	2,6	2,0	2,9	2,8	2,6
Cs	3,6	4,6	5,3	4,4	6,6	4,9	3,5	5,3	4,7	4,8
Ba	425,0	421,4	403,2	644,3	410,7	590,0	194,5	510,4	524,4	458,2
La	8,4	12,9	23,0	10,1	26,5	15,5	11,9	26,2	21,9	17,4
Ce	17,9	17,3	20,3	19,0	46,0	18,9	15,3	35,0	15,0	22,7
Hf	15,0	10,8	6,6	5,9	8,9	6,3	3,3	6,2	3,9	7,4
Ta	12,0	4,2	2,9	3,4	3,3	3,4	2,8	4,1	4,2	4,5
W	2,2	1,9	1,8	1,9	2,1	2,1	1,6	2,0	2,2	2,0
Hg	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6	0,7	0,6
Tl	0,4	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6
Pb	121,3	117,9	5,5	6,1	6,2	9,0	8,1	46,0	15,8	37,3
Bi	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,6	0,6
Th	1,3	2,3	1,3	2,0	0,7	0,5	0,5	1,2	0,7	1,2
U	11,0	6,9	5,6	6,9	6,9	7,0	6,7	6,5	5,4	7,0

Tablo 3'de  $\text{SiO}_2$  miktarı incelendiğinde, değerler % 43,06-% 64,22 arasında değişiklik gösterdiği ve ortalamanın ise % 55,89 olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuç tipik bir soda-kireç camındaki orandan oldukça düşüktür ve bu da camın yapısında bir bozulma olduğuna işaret etmektedir. PED-XRF ile elde edilen bu sonuç ile SEM-EDX analizinden elde edilen  $\text{SiO}_2$  miktarları karşılaştırıldığında oransal olarak değerlerin uyuşmaması ile birlikte her iki analizde de cam örneklerde bir bozulmanın olduğu açıkça tespit edilmiştir.

Tablo 3'deki  $\text{Na}_2\text{O}$  miktarı incelendiğinde en düşük miktarın % 7,59 ve en yüksek miktarın % 14,92 olduğu, bu değerler tüm örnekler için ortalamasının % 10,97 olduğu tespit edilmiştir. Tipik bir silis-soda-kireç camı ile bu sonuçlar karşılaştırıldığında PED-XRF analizinden elde edilen  $\text{Na}_2\text{O}$  değerinin oldukça düşük olduğu saptanmıştır. Yine, Tablo 3'deki sonuçlar incelendiğinde  $\text{MgO}$  değerinin % 0,267-% 0,937 aralığında ve ortalamanın ise % 0,625 olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, SEM-EDX ile elde edilen  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{MgO}$  miktarlarından oldukça düşüktür.

Cam üretiminde dayanım artırıcı olarak kullanılan  $\text{CaO}$  oranı % 3,82-% 5,90 arasında değişen miktarlarda olup ortalama değer ise % 4,87'dir. PED-XRF ile elde edilen bu sonuç tipik silis-soda-kireç camındaki  $\text{CaO}$  değeri ile uyuşmaktadır.

Tüm analiz sonuçlarına göre, Nysa arkeolojik camlarının kimyasal analizinde, ana bileşenlerine bağlı olarak PED-XRF ile belirlenen cam tipini desteklemek için üçgen faz diyagramı (Triangle Plotting) kullanılmıştır. Camlar, numunelerin bulunduğu bölgeye bağlı olarak  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  ve  $\text{CaO}$  bileşenlerine göre gruplandırıldığında (Üçgen çizim); 1 olarak kategorize edilen bölge "soda-kireç camları (Demir Çağı, Antik Çağ, Erken Ortaçağ ve Ortaçağ)"; 2 olarak kategorize edilen bölge "bitkisel kül soda-kireç camları (Orta-Geç Tunç Çağı (Mısır, Miken, Mezopotamya))"; 3 olarak kategorize edilen bölge "soda ve potas karışık alkali camları (Geç Tunç Çağı)" ve 4 olarak kategorize edilen bölge "orman bitkileri külü potas-kireç camlarını (Ortaçağ)" (Fig. 7A) temsil etmektedir. SEM-EDX ve özellikle PED-XRF sonuçları (Fig. 7B), beklenenden düşük silika ve sodyum içeriğine rağmen Enez camlarının tipik soda-kireç-silika camı olduğunu ortaya koymaktadır (Fig. 7).



**Fig. 7:** A-Arkeolojik camların üretim tekniğine göre oluşturulan üçgen çizim diyagramı<sup>58</sup>, B-İncelenen örnekler için PED-XRF üçgen çizim diyagramı.

Her iki yöntemle yapılan analiz sonuçlarına göre MgO ve K<sub>2</sub>O ortalama değerleri % 1,5'dan düşük olduğu için<sup>59</sup> ergitici madde olarak natron, soda veya sodaca zengin bir mineralin kullanıldığı düşünülmektedir. Burada özellikle SEM-EDX analiz sonucunda ANK-G10 örneğinin MgO değeri % 1,93 olarak tespit edildiği için sadece bu örnek için bitki külü kullanılmış olabileceği düşünülmektedir.

Al elementi camda sık rastlanır ve bazı kuamların doğal bir bileşenidir. Cama daha fazla dayanıklılık ve daha düşük genleşme katsayısı sağlamaktadır. Bununla birlikte çok fazla Al, camın viskozitesini arttırmakta, ergimeyi ve çalışılmayı zorlaştırmaktadır. Antik dönem cam yapımında alüminyum yaygın olarak kullanılmıştır. Muhtemelen potaya kasıtlı olarak eklenmemiştir. Bununla birlikte, genellikle cam harmanında diğer hammaddelerle birlikte bir safsızlık olarak düşük derişimlerde (ağırlıkça % 1-5) bulunmaktadır. Feldspat en önemli alüminyum kaynağıdır. Kuvars kumu kullanılması ile özellikle Al gibi diğer elementler önemli miktarda cama girmektedir<sup>60</sup>.

PED-XRF analiz sonuçları incelendiğinde, cama renk veren madde olduğu bilinen Cu<sup>2+</sup> elementinin analiz edilen dokuz örnekte de tespit edildiği, en yüksek değer ise ANK-G7 örneğinde (655,4 ppm) saptandığı ortaya konulmuştur (Tablo 4). Yine tüm örneklerde kurşun (Pb)'un da varlığı söz konusudur. ANK-G7 ve ANK-G8 örneklerinde tespit edilen Pb değerleri diğer örneklerde bulunan Pb değerlerine göre nispeten daha yüksektir. Baskın yeşil renk elde etmek için cam harmanına Cu ile birlikte Pb konulduğu bilinmektedir<sup>61</sup>. Pb'un camın kimyasal

<sup>58</sup> Büyüksöy et al. 2021, 98.

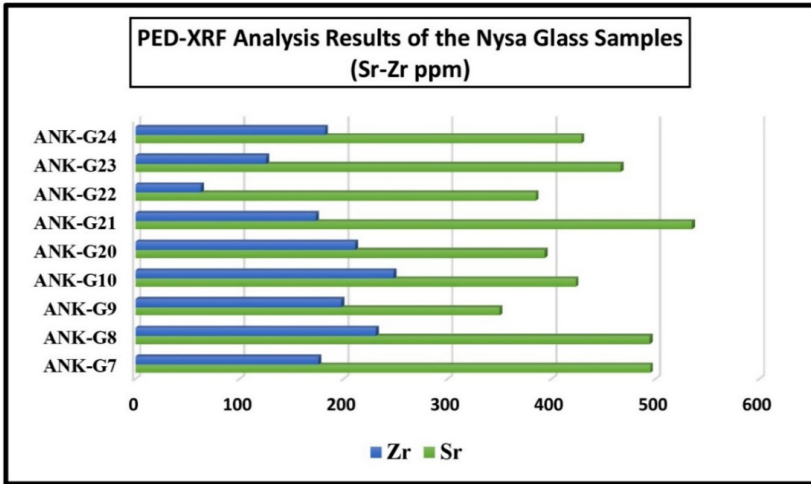
<sup>59</sup> Freestone 2003, 111-115; Paynter 2006, 1037-1057.

<sup>60</sup> Goffer 2007, 119; Jackson – Cottam 2015, 139-148.

<sup>61</sup> Kadıkova et al. 2017, 4, 5.

içeriğine bağlı olarak farklı düzeylerde bozulmaya neden olduğu da raporlanmıştır. Pb içeriği yüksek camlar, daha kararlı silika içeriğine sahip camların aksine en hızlı bozulma oranını göstermektedir<sup>62</sup>.

Sr ve izotopları, antik camların hem hammaddelerini hem de kökenlerini belirlemek için güçlü bir yöntemdir. Camdaki stronsiyumun çoğu muhtemelen camdaki kireç içeren bileşenlerden gelir (kalsiyum karbonat veya kireçtaşı içeren bir deniz kabuğu, kireç bakımından zengin bitki külü). Sr ve Zr miktarları, üretimde kullanılan kumun menşei hakkında bilgi verebilir. Sr miktarının yüksek olması (> 400 ppm), üretimde kullanılan kumun büyük olasılıkla deniz kökenli olduğunu göstermektedir<sup>63</sup>. Karasal kumlarda Sr miktarının 150 ppm'den az, Zr miktarının ise 160 ppm'den fazla olması beklenmektedir<sup>64</sup>. Tablo 4'de PED-XRF sonuçlarından elde edilen Sr içeriği 350,2 ppm ile 495,1 ppm arasında değişmektedir. Ayrıca, örneklerde Ba içeriği incelendiğinde, bir örnek hariç (ANK-G22) 400 ppm'den fazla bir değere sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı örneklerde  $Al_2O_3$  içeriği de ANK-G8 ve ANK-G20 örnekleri hariç % 1'e çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, cam üretiminde alkali feldspatça zengin kum kullanıldığını düşündürmektedir<sup>65</sup> (Fig. 8).



**Fig. 8:** Nysa cam numunelerinin Sr ve Zr elementlerine göre değişiminin PED-XRF analizi.

Klor (Cl), camda iyonik formda bulunmaktadır ve cam matriste çok küçük miktarlarda (tipik olarak soda-kireç-silika camında % 2'den az) çözünmektedir.

<sup>62</sup> Palomar et al. 2020, 10.

<sup>63</sup> Freestone et al. 2003, 19-32.

<sup>64</sup> Akyol et al. 2014, 10; Freestone et al. 2003, 19-32.

<sup>65</sup> Silvestri et al. 2008, 1489-1501.

Bozulmuş yüzeylerde klor iyonlarının varlığı, özellikle kütle ile ilgili artan değerler için yerinde oluşan tuzlarla açıklanabilir. Genellikle varlığı denizel ortamlarla ilgilidir<sup>66</sup>. Her iki analiz sonucunda da her bir örnek için klor elementi genel olarak % 0,40'in üzerinde tespit edilmiş olup, ortalama ise % 0,65'in üzerindedir. Ortalama değer in % 0,65'in üzerinde olması da denizel etkiyi desteklemektedir.

Camın genel yapısında düşük olan  $\text{SiO}_2$  miktarı SEM-EDX analiz sonucuna göre camın dış katmanında yani bozulma tabakasında daha yüksek bulunmuştur. Camın zamanla bozulması sonucu azalan  $\text{SiO}_2$  içeriği, cam yüzeyinde görülen bozulmayı desteklemektedir. Bozulma ilerledikçe jel tabakasında Si zenginleşmesi meydana gelmektedir<sup>67</sup>. Örneklerin SEM-EDX analizi sonuçları, PED-XRF'e kıyasla daha yüksek  $\text{SiO}_2$  içeriğine sahip olduğunu göstermiştir.

SEM-EDX ve PED-XRF ile elde edilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında, genel olarak SEM-EDX analizinden elde edilen sonuçların PED-XRF ile elde edilen analiz sonuçlarından daha yüksek oranda bulunduğu tespit edilmiştir. Camın yapısı hakkında bilgi almamıza yardımcı olan temel bileşenlerden  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarında bu sonuç gözlemlenmiştir. Bu durum, özellikle  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarlarının bozulan camlarda  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriğinin artması ile ilişkilendirilebilmektedir. PED-XRF analizinde camdan alınan belli miktardaki numunenin toz haline getirilip, homojen hale getirilerek bir pelet oluşturulması ve bu peletin analiz edilmesi, SEM-EDX analizinde ise örnek üzerinde seçilen bir noktanın veya bir alanın analizlenmesi gerçekleştirilmektedir. Buradaki esas konu seçilen bölgenin ne kadar bozulma tabakasından uzak olup olmadığıdır. Bu çalışmada, SEM-EDX ile analizler sırasında temiz bir alan belirlenip en az üç kez olmak üzere analizler gerçekleştirilmiş ve ortalama sonuçlar elde edilmiştir. Cam örneklerinde zamanla oluşan bozulmanın alt tabakalara kadar ilerlemesi mümkün olup, PED-XRF analizlerinde örnek hazırlama esnasında bir kısım bozulma tabakasının sonuçlara etki etmiş olabileceği düşünülmektedir.

## SONUÇ

Batı Anadolu'da bulunan Nysa antik kentindeki kazılardan ele geçen dokuz adet cam örnek üzerinde öncül arkeometrik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemelerde kimyasal analizlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, cam örneklerin tipik bir silis-soda-kireç camı yapısında olmakla beraber  $\text{SiO}_2$  içeriğinin beklenenden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, cam örneklerin toprak altında uzun süre kalması ve zaman içinde olumsuz çevre koşullarından etkilenmesinden kaynaklı olarak cam yapısında bir bozulmanın oluşabileceğini göstermektedir.

<sup>66</sup> Gueli et al. 2020, 218-225.

<sup>67</sup> Akyol et al. 2012, 217-223; Akyol – Kadioglu 2015, 27-36; Büyüksoy et al. 2021, 107.

Cam örneklerin SEM-EDX sonucuna göre benzer orandaki  $Al_2O_3$  içerikleri, örneklerin benzer hammadde kaynağından elde edilmiş olacağına işaret etmektedir.

Sr ve Zr içerikleri değerlendirildiğinde (yüksek stronsiyum içeriği, düşük zirkonyum içeriği) cam üretiminde kullanılan silika kaynağının genel olarak deniz (kıyı) olduğunu göstermektedir.

Tüm örneklerin yeşil renkli olduğu gözle görüldüğü gibi bu durum renk ölçüm sonuçları ile de desteklenmektedir. Cam örneklerine yeşil rengi veren ana elementin  $Fe^{2+}$  ve  $Cu^{2+}$  iyonları olduğu saptanmıştır.  $Cu^{2+}$  iyonlarının varlığı iz elementlerin tespitine izin veren PED-XRF analiz sonuçlarında tespit edilmiştir.

Camın üretim tekniği hakkında bilgi veren baloncuklar genellikle daireye yakın ve iri formlarda gözlenmiş ve buna bakılarak camların serbest üfleme tekniği ile üretildiği söylenebilmektedir.

Tarihi ve arkeolojik camlar son yıllarda gittikçe artan oranda ilgi görmektedir. Farklı dönemlere ait (Roma, Bizans, Selçuklu, Osmanlı) cam örneklerinin araştırılması Anadolu cam teknolojisinin anlaşılması için önemli ve gereklidir. Cam malzeme ve üretim teknikleri üzerinde yoğunlaşan arkeometrik araştırmalar sayesinde hem cam yapım yöntemlerindeki farklılıklar ve hammadde kaynaklarının belirlenmesi, hem de farklı dönemlere ait cam üretim teknolojilerinin daha ayrıntılı olarak ortaya çıkarılmasını mümkün kılacaktır. Bu da cam örneklerinin birbiri ile karşılaştırılabilmesine olanak sağlamaktadır.

### Teşekkür

Yazarlar, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı'na, Aydın Müze Müdürlüğü'ne ve Nysa kazı başkanı Prof. Dr. Serdar Hakan Öztaner'e teşekkürü bir borç bilirler. Aynı zamanda, SEM-EDX analizlerinin gerçekleştirildiği Turkish Cultural Foundation (TCF)-Cultural Heritage Preservation and Natural Dyes Laboratory (DATU Laboratuvarı)'na, PED-XRF analizlerinin yürütüldüğü Ankara Üniversitesi, Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM)'ne ve Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, MAKLAB'da görev alan Gülşen ALBUZ GEREN'e teşekkür ederler.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar, makale kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını ifade etmektedir.



## Yazar Katkı Oranları

Çalışmanın tasarlanması (Design of Study): ETG (%50), AAA (%50)

Veri Toplanması (Data Acquisition): ETG (%35), AAA (%35), RP (%30)

Veri Analizi (Data Analysis): ETG (%50), AAA (%50)

Makalenin yazımı (Writing up): ETG (%55), AAA (%45)

Makalenin gönderimi ve revizyonu (Submission and Revision): ETG (%50), AAA (%50)

## KAYNAKÇA

- Aerts et al. 1999, Aerts, A.-Janssens, K.-Adams, F.-Wouters, H., "Trace-Level Microanalysis of Roman Glass from Khirbet, Qumrân, Israel", *Journal of Archaeological Science* 26, 883-891.
- Akyol et al. 2009, Akyol, A.A.-Güray, Ç.G.-Kadioğlu, Y.K.-Demirci, Ş., "Elaiussa-Sebaste Cam Örnekleri Arkeometrik Çalışmaları", 24. Archaeometry Results Meeting, T.R. Ministry of Culture and Tourism Publication Nr: 3173 / General Directorate of Cultural Properties and Museums Publications Nr: 132, Ankara, 13-28.
- Akyol et al. 2012, Akyol, A.A.-Demirci, Ş.-Kadioğlu, Y.K.-Özgümüş, Ü., "İstanbul Yeni Cami Hünkar Kasrı Camları Üzerine Arkeometrik Çalışmalar", II. ODTÜ Arkeometri Çalıştayı- Türkiye Arkeolojisi'nde Cam: Arkeolojik ve Arkeometrik Çalışmalar Bildiri Kitabı (6-8 Ekim 2011). Ankara, 2012, 159-171.
- Akyol et al. 2014, Akyol, A.A.-Kadioğlu, Y.K.-Özgümüş, Ü.-Kanyak, S., "İstanbul Koca Ragıp Paşa Kütüphanesi Camları Arkeometrik Analizleri", *Journal of Turkish Studies* 9, 10, 5-17.
- Akyol-Kadioğlu 2015, Akyol, A.A.-Kadioğlu, Y.K., "Tekfur Sarayı Cam Buluntuları Arkeometrik Çalışmaları", *Türkiye Bilimler Akademisi Kültür Envanteri Dergisi (TÜBA-KED)*, 13, 27-36.
- Akyol-Erten 2016, Akyol, A.A.-Erten, A.E., "Archaeometrical Studies of Ancient Window Glass Finds From Olba (Silifke, Mersin) Excavation in Turkey", (eds. B. Stanislawski-H. Öniş), SOMA 2014, British Archaeological Reports, Archaeopress, 31-39.
- Akyol-Kadioğlu 2017, Akyol, A.A.-Kadioğlu, Y.K., "The Archaeometrical Analyses of Byzantine Glass Mosaic Tesserae From Three Different Sites in Turkey", *The Conservation and Presentation of Mosaics: At What Cost?*, 12th Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, 27-31 October 2014, Sardinia, Italy (eds. J. M. Teutonico-L. Friedman, A. Ben Abed-R. Nardi), The Getty Conservation Institute Publications, Hong Kong, 342-345.
- Akyol-Kadioğlu 2021, Akyol, A.A.-Kadioğlu, Y.K., "İstanbul Yenikapı Marmaray Cam Buluntularında Arkeometrik Analizler", *International Archaeology, Art, History and Cultural Heritage Congress*, November 13-14, 2021, Adana, The Proceeding Book (eds. M. A. Akkaya-K. Beşaltı), İKSAD Publications, Adıyaman, 59-78.
- Akyol et al. 2021, Akyol, A.A.-Kadioğlu, Y.K.-Erol, A.F., "Çingirt Kayası (Fatsa, Ordu) Erken Bizans Dönemi Camlarında XRF Analizi", *Arkeolojik Küçük Buluntular Pişmiş Toprak, Metal, Kemik, Cam ve Taş Eserler* (ed. O. Dumankaya), 404-436.
- Akyol-Koçak 2024, Akyol, A.A.-Akkuş Koçak, E., "Metropolis Aşağı Hamam-Palaestra ve Balneum Kazılarında Ait Pencere Camı Örneklerinde Arkeometrik Analizler", *Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* 23, 1, 1-14.
- Arletti et al. 2006, Arletti, R.-Dalconi, M.C.-Quartieri, S.-Triscari, M.-Vezzalini, G., "Roman Coloured and Opaque Glass: A Chemical and Spectroscopic Study", *Applied Physics A* 83, 239-245.
- Aydın et al. 2015, Aydın, M.-Akyol, A.A.-Erten, E.-Torgan, E., "Olba Kazısı Camları Arkeometrik Çalışmaları", *Selevcia Ad Calycadnm, Olba Kazısı Yayınları*, V-2015, 207-220.
- Bakırer 1985, Bakırer, Ö., "Cam Buluntularının Değerlendirilmesinde Arkeometrik Araştırmaların Önemi", VII Kazı Sonuçları, I. Arkeometri Toplantısı Bildiriler Kitabı, Ankara, 61-67.
- Bamford 1962, Bamford, C.R., "The Application of the Field Theory to Colored Glasses", *Physics and Chemistry of Glasses* 3, 189-202.
- Baykan 2014, Baykan, C., *Toprak Altı Cam Buluntuların Koruma ve Onarımı*, İstanbul.
- Beşer et al. 2010, Beşer, E.-Uzun, A.-Demirci, Ş.-Akyol, A.A.-Kadioğlu, Y.K., "Archaeometry of the Glass from Alanya, Late Antique/Early Byzantine Glass in the Eastern Mediterranean", (ed. E. Laflı), 213-233.

- Brems–Degryse 2014, Brems, D.D.–Degryse, P.P., "Trace Element Analysis in Provenancing Roman Glassmaking", *Archaeometry* 56, 1, 116–136.
- Brill 1988, Brill, R. H., "Scientific Investigations of the Jalame Glass and Related Finds" Excavations at Jalame: Site of a Glass Factory in late Roman Palestine, 257–294.
- Büyüksoy 2020, Büyüksoy, D.Ç., Enez (Ainos) Kazısı Su Terazisi ve Kral Kızı Bölgelerinde Ele Geçen Camların Bozulmaları Üzerine Arkeometrik Çalışmalar, (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Büyüksoy et al. 2021, Büyüksoy, D.Ç.–Akyol, A.A.–Kocabaş, I.Ö., "Archaeometric Studies on the Characterization and Deteriorations of Glass Artifacts of Su Terazisi and Kral Kızı Regions in Enez (Ainos) Excavation", *Art-Sanat*, 16, 87–122.
- Büyüksoy et al. 2023, Çolak Büyüksoy, D.–Akyol, A.A.–Özsait Kocabaş, I., "Enez (Ainos) Camlarının Bozulmaları Üzerine Arkeometrik Değerlendirmeler", Enez Kitabı (eds. H. Kayıcı–E. Ünsal), 513–562.
- Davison 2003, Davison, S., *Conservation and Restoration of Glass* (2nd ed.). Oxford.
- Degryse–Schneider 2008, Degryse, P.–Schneider, J., "Pliny the Elder and Sr–Nd Isotopes: Tracing the Provenance of Raw Materials for Roman Glass Production", *Journal of Archaeological Science* 35, 7, 1993–2000.
- Diler–Öztaner 2021, Diler, M.–Öztaner, S.H., "Nysa Antik Kenti Kazıları Konservasyon–Restorasyon Çalışmaları", *Asbider (Akademi Sosyal Bilimler Dergisi)* 8, 22, 183–203.
- Gratuze–Janssens 2004, Gratuze, B.–Janssens, K., "Provenance Analysis of Glass Artefacts", *Comprehensive Analytical Chemistry Volume XLII: NonDestructive Microanalysis of Cultural Heritage Materials*, (eds. K. Janssens–R.V. Grieken), Amsterdam.
- Fermo et al. 2016, Fermo, P.–Andreoli, M.–Bonizzoni, L.–Fantauzzi, G.–Giubertoni, G.–Ludwing, N.–Rossi, A., "Characterisation of Roman and Byzantine Glasses from Surroundings of Thugga (Tunisia): Raw Material and Colours", *Microchemical Journal* 129, 5–15.
- Foster–Jackson 2009, Foster, H.E.–Jackson, C.M., "The Composition of Naturally Coloured Late Roman Vessel Glass from Britain and the Implications for Models of Glass Production and Supply", *Journal of Archaeological Science* 36, 189–204.
- Freestone et al. 2000, Freestone, I.C.–Gorin Rosen, Y.–Hughes, M.J., "Primary Glass from Israel and the Production of Glass in Late Antiquity and in the Early Islamic Period, La route du verre: ateliers primaires et secondaires du second millénaire av. J.C. au Moyen Âge, Travaux de la Maison de l'‘Orient Méditerranéen, (ed. M.D. Nenna), Lyon, 33, 65–83.
- Freestone et al. 2002, Freestone, I.C.–Ponting, M.–Hughes, J., "The Origins of Byzantine Glass from Maroni Petra, Cyprus", *Archaeometry* 44, 257–272.
- Freestone 2003, Freestone, I.C., "Primary Glass Sources in the Mid First Millennium A.D.", *Annales du 15e Congrès de l'Association Internationale pour l'histoire du Verre*, 111–115.
- Freestone et al. 2003, Freestone, I.C.–Leslie, K. A.–Thirlwall, M.–Gorin–Rosen, Y., "Strontium Isotopes in the Investigation of Early Glass Production: Byzantine and Early Islamic Glass from the Near East", *Archaeometry* 45, 1, 19–32.
- Freestone 2006, Freestone I.C., "Glass Production in Late Antiquity and the Early Islamic Period: A Geochemical Perspective", *Geomaterials in Cultural Heritage*, (eds. M. Maggetti–B. Messiga), London: Geological Society Special Publications 257, London, 201–216.
- Freestone 2009, Freestone, I.C., "Pliny on Roman Glassmaking", *Archaeology, History and Science: Integrating Approaches to Ancient Materials*, (eds. M. Martinon–Torres–T. Rehren), California: Left Coast Press.
- Ganio et al. 2012, Ganio, M.–Boyen, S.–Brems, D.–Scott, R.–Foy, D.–Latruwe, K.–Molin, G.–Silvestri, A.–Vanhaecke, F.–Degryse, P., "Trade Routes Across the Mediterranean: A Sr/Nd Isotopic Investigation on Roman Colourless Glass", *Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology Part A* 53, 5, 217–224.
- Goffer 2007, Goffer, Z., *Archaeological Chemistry*, New Jersey.
- Gueli et al. 2020, Gueli, A.–Pasquale, S.–Tanasi, D.–Hassam, S.–Lemasson, Q.–Moignard, B.–Pacheco, C.–Pichon, L.–Stella, G.–Politi, G., "Weathering and Deterioration of Archeological Glasses from Late Roman Sicily", *International Journal of Applied Glass Science* 11, 215–225.
- Henderson 2000, Henderson, J., *The Science and Archaeology of Materials: An Investigation of Inorganic Materials*, London.
- Henderson et al. 2010, Henderson, J.–Evans, J.–Nikita, K., "Isotopic Evidence for the Production, Provenance and Trade of Late Bronze Age Glass in the Mediterranean", *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 10, 1, 1–25.
- Henderson 2013, Henderson, J., *Ancient Glass and An Interdisciplinary Exploration*, Cambridge University Press, 320–325.

- Huisman et al. 2009, Huisman, D.J.-De Groot, T.-Pols, S.-Van Os, B.J.H.-Degryse, P., "Compositional Variation in Roman Colourless Glass Objects from the Bochtotz Burial (The Netherlands)", *Archaeometry* 51, 3, 413-439.
- İdil-Kadioğlu 2009, İdil V.-Kadioğlu, M., "2007 Yılı Nysa Kazı ve Restorasyon Çalışmaları", 30, Kazı Sonuçları Toplantısı, 3, 499-520.
- İdil et al. 2010, İdil, V.-Kadioğlu, M.-Beckmann, M.-Özbil Serin, C.-Tamsü Polat, R., "2008 Yılı Nysa Kazı ve Restorasyon Çalışmaları", 31, Kazı Sonuçları toplantısı, 2, 271-296.
- Jackson 2005, Jackson, C.M., "Making Colourless Glass in the Roman Period", *Archaeometry* 47, 763-80.
- Jackson-Cottam 2015, Jackson, C.M.-Cottam, S., "A Green Thought in a Green Shade: Compositional and Typological Observations Concerning the Production of Emerald Green Glass Vessels in the 1st Century A.D.", *Journal of Archaeological Science* 61, 139-48.
- Jackson-Paynter 2016, Jackson, C.M.-Paynter, S., "A Great Big Melting Pot: Exploring Patterns of Glass Supply, Consumption and Recycling in Roman Coppergate, York", *Archaeometry* 58, 1, 68-95.
- Jackson et al. 2016, Jackson, C.M.-Paynter, S.-Nenna, M.-Degryse, P., "Glassmaking Using Natron from el-Barnugi (Egypt); Pliny and the Roman Glass Industry", *Archaeological and Anthropological Sciences* 10, 1179-1191.
- Janssens 2004, Janssens, K., "X-Ray Based Methods of Analysis", *Comprehensive Analytical Chemistry. Volume XLII: Non-Destructive Microanalysis of Cultural Heritage Materials*, (eds. K. Janssens-R.V. Grieken), Amsterdam.
- Johnson et al. 1999, Johnson, D.M.-Hooper, P.R.-Conrey, R.M., "XRF Analysis of Rocks and Minerals for Major and Trace Elements on a Single Low Dilution Li-tetraborate Fused Bead", *Advances in X-ray Analysis* 41, 843-867.
- Kadioğlu 2011, Kadioğlu, M., "Vorbericht über die Arbeiten im Gerontikon von Nysa am Mäander 2006-2009", *JDL* 126, 107-154.
- Kadioğlu 2014, Kadioğlu, M., *Das Gerontikon von Nysa am Mäander, Forschungen in Nysa am Mäander, Band 3, Darmstadt*.
- Kadikova et al. 2017, Kadikova, I.-Morozova, E.-Yuryeva T.V.-Grigorieva, I.A., "Study of Deteriorating Turquoise Lead-Potassium Glass Beads at Different Stages of Corrosion Using Micro-FTIR Spectroscopy", *Submitted to Materials Today: Proceedings*, 1-7.
- Knappet et al. 2011, Knappet, C.-Pirrie, D.-Power, M.R.-Nikolakopoulou, I.-Hilditch, J.-Rollinson, G.K., "Mineralogical Analysis and Provenancing of Ancient Ceramics Using Automated SEM-EDS Analysis", *Thera. J. Archaeol. Science* 38, 2, 219-232.
- Kramar 1999, Kramar, U., "X-Ray Fluorescence Spectrometers", *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, 2467- 2477.
- Kursula 2000, Kursula, P.K., "Accuracy, Precision and Detection Limits of SEM-WDS, SEM-EDS and PIXE in the Multi-Elemental Analysis of Medieval Glass", *X-ray Spectrometry* 29, 111-118.
- La Tour 1989, La Tour, T.E., "Analysis of Rocks Using X-ray Fluorescence Spectrometry", *The Rigaku Journal* 6, 1, 3-9.
- Lambert 1997, Lambert, J., *Traces of the Past; Unravelling the Secrets of Archaeology through Chemistry*, Cambridge.
- Lipták 2003, Lipták, B.G., "Elemental Monitors", *Instrument Engineers' Handbook, Process Measurement and Analysis, Volume 1*, 133 London, New York, Washington, 1344- 1346.
- Luckner 1994, Luckner, K.T., "Ancient Glass", *Art Institute of Chicago Museum Studies* 20, 1, 78-91.
- Mantler-Schreiner 2000, Mantler, M.-Schreiner, S., "X-Ray Fluorescence Spectrometry in Art and Archaeology", *X-Ray Spectrometry* 29, 1, 3-17.
- Nenna 2014, Nenna, M.D., "Egyptian Glass Abroad, HIMT Glass and its Markets", *Neighbours and Successors of Rome: Traditions of Glass Production and use in Europe and the Middle East in the Later First Millennium AD*, (eds. D.D. Keller-J.J. Price-C.C. Jackson), Oxford & Philadelphia, 177-193.
- Ohno 2007, Ohno, Y., "Spectral Color Measurement", *Colorimetry: Understanding the CIE System*, (ed. J. Schanda), Bölüm 5, New York, 101-132.
- Öztaner 2018, Öztaner, S.H., "Nysa Antik Kenti Şehir Planlaması", II. International Congress of Urban Environment Health, Nevşehir, 923-929.
- Öztaner 2022, Öztaner, S.H., "Büyük Menderes Vadisinin Çift Yakalı Kenti: Nysa ad Maeandrum", *Lycus Dergisi*, 6, 225-250.
- Palomar et al. 2020, Palomar, T.-Mosa, J.-Aparicio, M., "Hydrolytic Resistance of K<sub>2</sub>O-PbO-SiO<sub>2</sub> Glasses in Aqueous and High-Humidity Environments", *Journal of the American Ceramic Society* 103, 9, 5248-5258.
- Paynter 2006, Paynter, S., "Analyses of Colourless Roman Glass from Binchester, County Durham", *Journal of Archaeological Science* 33, 1037-1057.
- Pollard-Heron 1996, Pollard, A.M.-Heron, C., *Archaeological Chemistry*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Pollard-Heron 2008, Pollard, A.M.-Heron, C., *Archaeological Chemistry in Archaeology*, Cambridge.

- Rasmussen 2012, Rasmussen, S.C., *How Glass Change the World—the History and Chemistry of Glass from Antiquity to the 13th Century*, USA.
- Renfrew-Bahn 2004, Renfrew, C.-Bahn, P., *Archaeology Theories, Methods and Practice*, London.
- Sayre-Smith 1961, Sayre, E.V.-Smith, R.W., "Compositional Categories of Ancient Glass", *Science* 133, 3467, 1824-1826.
- Schibille et al. 2017, Schibille N.N.-Sterrett-Krause, A.A.-Freestone, I.C., "Glass Groups, Glass Supply and Recycling in Late Roman Carthage", *Archaeological and Anthropological Science* 9, 1223-1241.
- Shackley 2011, Shackley, M.S., *X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology*.
- Shortland-Eremin 2006, Shortland, A.J.-Eremin, K., "The Analysis of Second Millennium Glass from Egypt and Mesopotamia", Part 1: New WDS Analyses, *Archaeometry* 48, 581-603.
- Shortland 2012, Shortland, A.J., *Lapis Lazuli from the Kiln: Glass and Glassmaking in the Late Bronze Age*, Leuven: Leuven University Press.
- Silvestri et al. 2005, Silvestri, A.-Molin, G.-Salviulo, G., "Roman and Medieval Glass from the Italian Area: Bulk Characterisation and Relationships with Production Technology", *Archaeometry* 47, 797-816.
- Silvestri et al. 2008, Silvestri, A.-Molin, G.-Salviulo, G.-Schievenin, R., "The Colourless Glass of Iulia Felix", *Journal of Archaeological Science* 35, 331-341.
- Silvestri et al. 2018, Silvestri, A.-Gallo, F.-Maltoni, S.-Degryse, P.-Ganio, M.-Longinelli, A.-Molin, G., "Things that Travelled: A Review of the Roman Glass from Northern Adriatic", *Things that travelled. Mediterranean Glass in the First Millennium AD*, (eds. D. Rosenow-M. Phelps-A. Meek-I.C. Freestone), London, 346-367.
- Stephens-Calder 2004, Stephens, W.E.-Calder, A., "Analysis of Non-Organic Elements in Plant Foliage Using Polarised X-Ray Fluorescence Spectrometry", *Analitica Chimica Acta* 527, 89-96.
- Stuart 2007, Stuart, B., "Analytical Techniques in Material Conservation", Chichester.
- Tait 1991, Tait, H., *Five Thousand Years of Glass*, London.
- Verità et al. 2002, Verità, M.-Renier, A.-Zecchin, S., "Chemical Analyses of Ancient Glass Findings Excavated in the Venetian Lagoon", *Journal of Cultural Heritage* 3, 261-271.
- Verità 2004, Verità, M., "Natura e tecnologia dei vetri pompeiani attraverso le analisi chimiche dei reperti", *Vetro Fra Arte e Scienza Nel Mondo Romano*, (eds. M. Beretta-G. Di Pasquale), Prato, 163-167.
- Wagner et al. 2008, Wagner, B.-Nowak, A.-Bulska, E.-Kunickigoldfinger, J.-Schalm, O.-Janssens, K., "Complementary Analysis of Historical Glass by Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy and Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry", *Microchimica Acta* 162, 3-4, 415-424.
- Wedepohl-Baumann 2000, Wedepohl, K.H.-Baumann, A., "The Use of Marine Molluscan Shells for Roman Glass and Local Raw Glass Production in Eifel Area (Western Germany)", *Naturwissenschaften* 87, 129-132.
- Whitehouse 2012, Whitehouse, D., *Glass: A Short History*, Washington.
- Wight 2011, Wight, K., *Molten Color Glassmaking in Antiquity*, Los Angeles.
- Wilson-Pollard 2005, Wilson, L.-Pollard, A.M., "The Provenance Hypothesis", *Handbook of Archaeological Sciences*, (ed. A.M. Pollard), West Sussex.

## Online Kaynaklar

- <https://www.haberlerturkiye.com.tr/turkiye-haritasi-siyasi-renkli-turkiye-nin-illeri-haritasi-sehir-isimleri-listesi/37267/> Accessed 06 September 2023.
- <http://nysa.ankara.edu.tr/agora/> Accessed 06 July 2023.
- <https://www.blabmarket.com/blog/icerik/renk-olcumu-nedir-kolorimetre-nasil-calisir?srsltid=AfmBOoq0Wo-ZOxQJLCEV9ImiE819ZY6QKtJ2dEjyBQ6BYFdPipkewKE-b> Accessed 04 September 2024.