

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**ERKEN BİZANS DÖNEMİ THEODOSIUS LİMAN ŞEHRİ SERAMİK
BULUNTULARININ NÜKLEER TEKNİKLERLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Hamdi VARAN

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı

Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**ERKEN BİZANS DÖNEMİ THEODOSIUS LİMAN ŞEHRİ SERAMİK
BULUNTULARININ NÜKLEER TEKNİKLERLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet Hamdi VARAN
(302121013)**

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı

Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı

**Tez Danışmanı: Prof.Dr.Sema ERENTÜRK
Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim
Programı : Herhangi Program**

OCAK 2015

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 302121013 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ahmet Hamdi VARAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ERKEN BİZANS DÖNEMİ THEODOSIUS LİMAN ŞEHİRİ SERAMİK BULUNTULARININ NÜKLEER TEKNİKLERLE İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof.Dr. Sema ERENTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. A. Beril TUĞRUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Murat BENGİSU
İzmir Ekonomi Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **19 Ocak 2015**

ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans tez çalışmasında, nötron aktivasyon analizi ve X-ışını floresans analiz yöntemleri kullanılarak Yenikapı metro ve Marmaray çalışmaları sırasında açığa çıkan Erken Bizans Dönemi liman şehirlerinden Theodosius'da bulunan arkeolojik etütlük seramik buluntularının kimyasal kompozisyonları belirlenmeye çalışılmış, eserlerin ait olduğu döneme ait teknolojik bilgilere ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu çalışma ile mevcut ve sürdürülen çalışmalar birleştirildiğinde, yapılan değerlendirmelerin daha anlam kazanacağı umulmaktadır.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca değerli bilgi birikimlerini benden esirgemeyen; maddi manevi her türlü imkanı sağlamaya çalışan, akademik çalışmalarındaki tecrübeleri ile beni teşvik eden değerli danışman hocam Sn. Prof.Dr.Sema ERENTÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yine Enerji Enstitüsü akademisyenlerinden Sn. Yrd.Doç.Dr.Sevilay HACİYAKUPOĞLU'na verdikleri emeklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasında, nötron aktivasyon analizleri Center of Accelerators and Nuclear Analytical Methods (CANAM) tarafından desteklenerek (Protocol ID: 155) Çek Cumhuriyeti Nükleer Araştırma Enstitüsü (REZ)'de gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, nötron aktivasyon analizi (NAA) deneylerinin gerçekleştirilmesindeki özverili yardımlarından dolayı Dr.Marie KUBESOVA ve Prof.Dr.Jan KUCERA'ya çok teşekkür ederim. XRF analizlerinde laboratuvar ekipman destekleri, ilgi, alaka ve yardımlarından dolayı Y.Müh.Alpaslan ERENTÜRK ve Cavit KAYADİBİ'ne, arkeolojik eserlerin elde edilmesi sürecindeki yardımları ve gösterdikleri misafirperverliklerinden dolayı başta İstanbul Arkeoloji Müzeleri Müdürü Sn. Zeynep S. KIZILTAN ve Arkeolog Mehmet Ali POLAT olmak üzere tüm müze personeline teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, tezimin her aşamasında benden yardımlarını esirgemeyen biricik sözlüme, her türlü olanağı sağlayarak beni bugünlere getiren, her zaman sevgi ve desteklerini yanımda hissettiğim aileme en derin duygularıyla teşekkür ederim.

Ocak 2015

Ahmet Hamdi VARAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK KISIM : RADYASYON BİLİMİ.....	5
2.1 Radyasyon ve Radyoaktivite	5
2.1.1 Radyoaktif bozunma ve aktivite	5
2.1.2 Radyasyonun sınıflandırılması.....	6
2.1.3 Elektromanyetik spektrum	8
2.2 Radyasyon Ailesi İçinde Nötronlar	9
2.2.1 Nötronların madde ile etkileşimi.....	10
2.2.1.1 Saçılma etkileşimleri.....	10
Elastik saçılma	10
İnelastik Saçılma	11
2.2.1.2 Soğurma etkileşimleri	11
Nötron yakalanması	12
Nükleer Fisyon	12
2.2.2 Nötron tesir kesiti.....	13
2.2.3 Nötron kaynakları ve eldesi	13
2.3 Radyasyon Ailesi İçinde Nötronlar	14
2.3.1 X-ışınlarının Keşfi.....	14
2.3.2 X-ışınlarının genel özellikleri	15
2.3.3 X-ışınlarının çeşitleri.....	15
2.3.3.1 Sürekli (Frenleme tipi) X-ışınları.....	15
2.3.3.2 Karakteristik X-ışınları.....	16
2.3.4 X-ışını tüpü	17
2.3.5 X-ışınlarının madde ile etkileşmesi.....	17
2.3.5.1 Fotoelektrik etki	18
2.3.5.2 Compton saçılması.....	19
2.3.5.3 Rayleigh saçılması	20
2.3.5.4 Çift oluşumu.....	20
3. NÜKLEER TEKNİKLER İLE ARKEOMETRİK ANALİZLER.....	23
3.1 Arkeolojik Eserlerde Element Analiz Yöntemleri	23
3.2 Nötron Aktivasyon Analizi	23
3.2.1 Nötron aktivasyon analizi ve temel bilgiler	23

3.2.2 Nötron aktivasyon analizi çeşitleri	24
3.2.2.1 Enstrümental nötron aktivasyon analizi	25
Enstrümental nötron aktivasyon analizi deneysel ilkeleri	25
3.2.3 Nötron aktivasyon analizi prosedürleri	27
3.2.3.1 Numune hazırlama	27
3.2.3.2 Işınlama	28
Doğal izotoplar ve izotopik bolluk	28
3.2.3.3 Ölçme	28
Gama spektrumu	28
3.2.4 Nötron aktivasyon analizinin avantaj ve dezavantajları	29
3.2.4.1 Avantajları	29
3.2.4.2 Dezavantajları	30
3.2.5 Nötron aktivasyon analizinin kullanım alanları	30
3.3 X-ışını Floresans Tekniği	31
3.3.1 X-ışını floresans tekniğine giriş	31
3.3.2 X-ışını floresans tekniği çeşitleri	31
3.3.2.1 Dalgaboyu dağılımlı X-ışını floresans spektrometresi	32
Bragg yasası	32
3.3.2.2 Enerji dağılımlı X-ışını floresans spektrometresi	33
3.3.3 X-ışını floresans tekniği için numune hazırlanması	35
3.3.4 X-ışını floresans tekniğinin kullanım alanları	36
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
4.1 Arkeolojik Numuneler	37
4.1.1 Kazı bölgesine ait bilgiler	37
4.1.2 Arkeolojik numunelerin toplanması ve sınıflandırılması	40
4.2 Seramik Buluntularının Analize Hazırlanması	43
4.2.1 Öğütme	43
4.2.2 Hassas terazide tartım ve karıştırma	43
4.2.3 Peletleme	44
4.3 Seramik Buluntuların Analiz Edilmesi	44
4.3.1 Nötron aktivasyon analizi deney sistemi ve özellikleri	44
4.3.2 X-ışını floresans analizi deney sistemi ve özellikleri	45
4.3.3 İstatistiksel analizler	45
5. DENEY SONUÇLARI	47
5.1 Nötron Aktivasyon Analizi ve XRF Analizi Sonuçları	47
5.2 İstatistiksel Analiz Sonuçları	56
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	69

KISALTMALAR

AG	: Amphora Gövde
A.Ş.	: Anonim Şirketi
CANAM	: Center of Accelerators and Nuclear Analytical Methods
DGNAA	: Gecikmiş Gama Nötron Aktivasyon Analizi
ENAA	: Epitermal Nötron Aktivasyon Analizi
FNA	: Hızlı Nötron Aktivasyon Analizi
EMS	: Elektromanyetik Spektrum
EDXRF	: Enerji dağılımlı X-Işını Floresans Tekniği
HCA	: Hierarchical Cluster Analysis (Hiyerarşik Kümeleme Analizi)
INAA	: Enstrümental Nötron Aktivasyon Analizi
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
M.S.	: Milattan Sonra
NAA	: Nötron Aktivasyon Analizi
PGNAA	: Ani Gama Nötron Aktivasyon Analizi
PIXE	: Proton Uyarmalı X-ışını Analizi
RCR	: Research Reactor
REZ	: Çek Cumhuriyeti Nükleer Araştırma Enstitüsü
WDXRF	: Dalgaboyu dağılımlı X-ışını Floresans
XRF	: X-Işını Floresans
XRD	: X-Işını Difraksiyon

SEMBOL LİSTESİ

A^0	: Angstrom
$A(t)$	: Son aktivite
b	: Barn
Bq	: Becquerel
β	: Saçılma açısı
c	: Işık hızı
C	: Sayım (Count)
$CaCO_3$	: Kalsit bileşiği
Ci	: Curie
cm	: Santimetre
E_0	: Fotonun ilk enerjisi
E_k	: Nötronun enerji kaybı
E_γ	: Gelen fotonun enerjisi
eV	: Elektronvolt
h	: Plank sabiti
Hz	: Hertz
I_B	: Elektronu koparabilmek için gerekli olan bağ enerjisi
K	: Kelvin
K_e	: Kopan elektronun kinetik enerjisi
keV	: Kiloelektronvolt
MeV	: Megaelektronvolt
m_e	: Elektronun kütlesi
m_e^+	: Pozitronun kütlesi
m_0	: Elektronun durgun kütlesi
m_n	: Nötronun kütlesi
mg	: Miligram
mL	: Mililitre
MPa	: Megapaskal
MW	: MegaWatt
n	: Tamsayı
1n	: Nötron
N	: Radyoaktif çekirdek sayısı
N_0	: Başlangıç çekirdek sayısı
nm	: Nanometre
ppm	: Milyonda-bir
ppb	: Milyarda-bir
^{239}Pu	: Plütonyum-239 izotopu
sn	: Saniye
t	: Zaman
T_{e^+}	: Pozitronun kinetik enerjisi
T_{e^-}	: Elektronun kinetik enerjisi
^{232}Th	: Toryum-232 izotopu

t_k	: Kısa zamanlı sayım süresi
t_u	: Uzun zamanlı sayım süresi
u	: Belirsizlikler
^{233}U	: Uranyum-233 izotopu
^{235}U	: Uranyum-235 izotopu
^{238}U	: Uranyum-238 izotopu
v	: Nötron hızı
Z	: Atom numarası
γ	: Gama Işını
α	: Alfa Işını
μ	: Frekans
λ	: Gelen fotonun dalga boyu
λ'	: Saçılan fotonun dalga boyu
$\Delta\lambda$	: Gelen foton ile saçılan fotonun dalga boyu arasındaki fark
θ	: Saçılma açısı
θ'	: Gelen ışının kristal yüzeyi ile yaptığı açı
$\mu\text{g/g}$	: Mikrogram / gram
σ_{act}	: Güvenilirlik aralığı
Φ_f	: Nötron akısı (nötron/m ² .s)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Elektromanyetik spektruma ait bilgiler.....	8
Çizelge 2.2 : Nötronların sınıflandırılması.....	9
Çizelge 2.3 : Be (α,n) nötron kaynaklarının karakteristiği.....	14
Çizelge 4.1 : Seramik örneklerine ait temel veriler.....	41
Çizelge 4.2 : Nötron aktivasyon analizinin yapıldığı reaktöre ait bazı veriler.....	45
Çizelge 5.1 : NAA ve XRF analiz sonuçları.....	50
Çizelge 5.2 : 34 No.lu bezemeli seramiğin bezeme ve iç astarının kimyasal kompozisyonu.....	53
Çizelge 5.3 : 43 No.lu bezemeli seramiğin bezeme ve iç astarının kimyasal kompozisyonu.....	54
Çizelge 5.4 : 44 No.lu bezemeli seramiğin bezeme ve iç astarının kimyasal kompozisyonu.....	54
Çizelge 5.5 : Dendograma ait kümeleme verileri.....	57

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Radyasyonun enerjisine göre sınıflandırılması.....	7
Şekil 2.2	: Radyasyonun türüne göre sınıflandırılması.....	7
Şekil 2.3	: Radyasyonun kaynağına göre sınıflandırılması.....	8
Şekil 2.4	: Elektromanyetik spektrum.....	8
Şekil 2.5	: Nötron enerji-relatif nötron akı grafiği.....	9
Şekil 2.6	: Nötronun bir çekirdekten elastik saçılması.....	12
Şekil 2.7	: Nötronun inelastik saçılması.....	11
Şekil 2.8	: Nötron yakalanması.....	12
Şekil 2.9	: Fisyon olayı.....	12
Şekil 2.10	: X-ışınları ve diğer elektromanyetik radyasyonlar.....	15
Şekil 2.11	: X-ışınlarına ait dalga boyu-sayım grafiği.....	16
Şekil 2.12	: Karakteristik X-ışını spektrumu.....	16
Şekil 2.13	: Yörünge geçişleri.....	17
Şekil 2.14	: X-ışını tüpü.....	17
Şekil 2.15	: X-ışınlarının madde ile etkileşmesi.....	18
Şekil 2.16	: Fotoelektrik etki şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.17	: Compton saçılması şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.18	: Rayleigh saçılması şematik gösterimi.....	20
Şekil 2.19	: Çift oluşumu şematik gösterimi	21
Şekil 3.1	: Enstrümental nötron aktivasyon analizi element duyarlılığı.....	26
Şekil 3.2	: Numune örnekleri.....	27
Şekil 3.3	: Bir nükleer reaktöre ait resimler	28
Şekil 3.4	: Gama spektrometre sistemi akış diyagramı.....	28
Şekil 3.5	: Gama ışıını spektrometresi ve modern gama spektrometre cihazı.....	29
Şekil 3.6	: EDXRF ve WDXRF spektrometrelerinin temel planları	31
Şekil 3.7	: Dalga boyu dağılımlı X-ışını (WDXRF) cihazı.	32
Şekil 3.8	: Bragg yasası.	33
Şekil 3.9	: Tipik enerji dağılımlı X-ışını (EDXRF) spektrumu	33
Şekil 3.10	: XRF tekniği ile analiz edilebilen elementler.....	34
Şekil 3.11	: Enerji dağılımlı XRF tekniği prensibi ve modern sistemi.....	35
Şekil 3.12	: X-ışını floresans tekniği numune biçimleri.....	35
Şekil 3.13	: X-ışını floresans tekniğinin kullanım alanları.....	35
Şekil 4.1	: Yenikapı kazı bölgesine ait uydu harita	37
Şekil 4.2	: Yenikapı kazı alanı çalışmalarından bir görüntü.....	38
Şekil 4.3	: Yenikapı kazılarında ele geçen Yenikapı-35 adlı batık gemi.....	38
Şekil 4.4	: Yenikapı kazıları vaziyet planı.....	39
Şekil 4.5	: Tarihte Theodosius Limanı ve haritası.....	40
Şekil 4.6	: Arkeolojik etütlük buluntuların teslim alındığındaki durumu.....	40
Şekil 4.7	: Seramik numunelerin resimleri	42
Şekil 4.8	: Bilyalı öğütücü ve öğütülen seramik numunelerinin biçimi	43

Şekil 4.9 : Hassas terazi tartımları ve agat havanda karıştırma işlemi ve elemanları	43
Şekil 4.10 : Peletleme cihazı ve peletlenmiş numunelerden bazıları.....	44
Şekil 4.11 : Deneylerin yapıldığı RCR reaktörü ve bu reaktör kalbinin diyagramı ..	44
Şekil 4.12 : Analiz için kullanılan enerji dağılımlı XRF cihazına ait resim.....	45
Şekil 5.1 : NAA ve XRF analiz sonuçları duyarlılığının birbiriyle kıyaslanması ...	47
Şekil 5.2 : Bezemeli seramiklerin orjinal görüntüleri.....	53
Şekil 5.3 : 34 nolu bezemeli seramik için major element bantları.....	53
Şekil 5.4 : Seramiklerin hiyerarşik kümelenmesi	56
Şekil 5.5 : Bezemeli numunelerin dendogramına ait kümeleme verileri.....	58
Şekil 5.6 : İstatistiksel sonuçların Yenikapı kazısı vaziyet planı üzerindeki dağılımı.....	59

ERKEN BİZANS DÖNEMİ THEODOSIUS LİMAN ŞEHRİ SERAMİK BULUNTULARININ NÜKLEER TEKNİKLERLE İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma Bakanlığı ile İstanbul Büyükşehir Belediyesi Marmaray ve Metro projeleri kapsamında Yenikapı kazılarında ele geçen, Erken Bizans Dönemine ait 33 adet etütlük seramik buluntusunun iç astar ve bezemelerinin kimyasal kompozisyonları nükleer teknikler kullanılarak belirlenmiştir. Etütlük seramik buluntular, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü İstanbul Arkeoloji Müzesi Müdürlüğü'nün özel izni ile alınmış ve incelenmiştir.

Seramik buluntuların iç astar ve pigmentlerinin kimyasal kompozisyonları, enstrümental nötron aktivasyon analizi (INAA) ve enerji dağılımlı X-ışını floresans spektrometresi (EDXRF) ile belirlenmiş ve dönemin seramik teknolojisine ilişkin bilgiler elde edilmeye çalışılmıştır.

Erken Bizans dönemi seramik buluntularının majör element içeriklerinin %50-70 SiO_2 , %10-34 Al_2O_3 , %2-6 FeO , %1-5 MgO , %1-5 K_2O , %2-20 CaO olduğu saptanmıştır. Seramiklerin kimyasal kompozisyonlarında K, Mg gibi alkaliler içermesi, alkali ihtiva eden kil grubuna girdiklerini göstermektedir.

Erken Bizans Dönemi tüm seramiklerine sırlamanın uygulandığı, ve sırlanmamış seramiklerin rağbet görmediği bilinmektedir. Bizans seramiklerinde kullanılan sır, kurşunlu sırdır ve bu sır özellikle kurşun oksitten oluşmaktadır. Seramiklerin sırlı yüzeylerinin elementel bileşimindeki kurşun oranının; sırlı olmayan iç kısımlarına nazaran yaklaşık 40 kat daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu sonuç, bu dönemde kurşun zehirlenmesi olasılığının yüksek olduğunu göstermektedir.

Analizler sonucu saptanan S içeriği, seramik buluntularında kalker ve alçı taşı mineralinin varlığının bir göstergesidir. 31, 32, 33, 38, 40 ve 42 No.lu seramik örneklerindeki kükürt miktarının, diğer seramik buluntularına göre daha düşük olması bu seramiklerinin hammaddesinin ve kaynağının diğerlerinden farklı olduğunu belirtisidir.

Seramik buluntuların kalsit (CaCO_3) içerikleri değişiktir. 2, 10, 12, 19, 20 ve 24 No.lu seramik buluntularında kalsiyum içeriği oldukça yüksek saptanmıştır.

Magnezyum bileşikleri, kalkerin oluşumu ve oluşumundan sonraki başkalaşmanın etkisi ile dolomit (CaMgCO_3) ve manyezit (MgCO_3)'in seramiğin yapısında bulunmasından ileri gelmektedir. Seramik buluntularında saptanan MgO içeriği %1 ila %6 arasında değişmektedir. Bu sonuç, seramiklerin yapısında değişen oranlarda kalker olduğunu göstermektedir.

Bu dönemde, seramik pişirme tekniğinin henüz çok gelişmediği hala düşük sıcaklıkta (<700 °C) pişirmenin yaygın olduğu söylenebilir.

Seramik buluntuların kimyasal kompozisyonları, Minitab 17.0 istatistiksel analiz programı kullanılarak, istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve benzer özellik gösteren seramikler tanımlanmıştır.

Yapılan istatistiksel analiz değerlendirmelerine göre 6 adet kümeleme oluşmuştur. Küme 1 ve 2 için iki seramik, Küme 3 için on iki seramik, Küme 4 için dört seramik, Küme 5 için iki seramik ve Küme 6 için beş seramik örneğinin aralarında gruplaştığı görülmüş ve her bir kümenin kendi içinde ve diğer kümelerle olan ilişkisi gösterilmiştir. Sonuçlara göre; benzerlik oranı en çok olan seramikler 31 ve 33 No.lu seramikler %96 şeklinde olmuştur. Bunun yanında, 30, 35 ve 40 No.lu seramikler üçlü bir bağlantı oluşturmak üzere kendi içinde %92 oranında bir benzerlik göstermiştir. 2 ve 20 No.lu seramikler ise %94 oranında benzerlikleriyle dikkat çeken kümelerin başında gelmiştir. %63 en az benzerlik oranı ve kümeleme açısından birbirleriyle en az bağlantısı olan küme 11 ve 32 No.lu seramiklerin oluşturduğu Küme 5'tir.

Elde edilen verilerden, seramik buluntuların hammadde içerikleri ve özellikleri, pişirilme sıcaklıkları, sır bileşimleri ve özellikleri gibi tarihe ışık tutacak ve yapıldıkları dönemi karakterize eden ve dönemin teknolojisini aydınlatmaya yarayacak bilgiler değerlendirilmiştir.

INVESTIGATION OF CERAMIC FINDINGS FROM EARLY BYZANTINE PERIOD OBTAINED FROM EXCAVATIONS OF THEODOSIUS HARBOR BY NUCLEAR TECHNIQUES

SUMMARY

In present study, 33 ceramic findings dated to Early Byzantine ages excavated by Republic of Turkey Ministry of Transport, Maritime Affairs and Communications, and Istanbul Metropolitan Municipality within “Marmaray and Metro Project” were quantitatively analysed according to inner self-slip and ornaments by means of chemical composition using nuclear techniques. Ceramic findings provided by private permissions from The Ministry of Culture and Tourism of Turkey General Directorate of The Istanbul Archaeological Museums.

In Yenikapı, during the activities, which have turned into the most comprehensive archaeological excavations related to the history of İstanbul, in Yenikapı, where a central station is going to be constructed, between 1 and 6.30 meters below the sea level, the Port of Theodosius, the largest port in the Early Byzantine Period was unearthed.

The purpose of this master thesis is to achieve analyzing inner lining, and ornaments of the ceramic finds which is found under the Port of Theodosius from the Early Byzantine period by using nuclear methods to characterize chemical composition, and to classify ceramics according to their origin by using statistical analysis method. By the obtained data, it is aimed to clarify that the materials which are used by the people that living in this area in their daily lives and to clarify the technology used to produce these materials.

Chemical composition of the inner self-slip and pigments of ceramic samples were analyzed by instrumental neutron activation analysis (INAA) and energy distributed X-ray fluorescence (EDXRF) spectrometer. Information about the ceramic technology of this period is to be achieved.

The application of the instrumental neutron activation analysis (INAA) and energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) spectrometer in support of provenance research of archaeological ceramics have been largely used over the past few decades. Both techniques are sensitive technique useful for quantitative multi-element analysis of major, minor, and trace elements. Among these, trace elements can be particularly useful to determine provenance of the mineral components in the paste of archaeological ceramics or to distinguish different ceramic groups, better differentiating diverse raw materials.

According to results, it was revealed that nearly all Early Byzantine ceramic samples major element composition were %50-70 SiO₂, %10-34 Al₂O₃, %2-6 FeO, %1-5 MgO, %1-5 K₂O, %2-20 CaO. Ceramic samples, which have basic element such as K, Mg in chemical composition, classified as basic clay materials.

It is known that glazing techniques are used for nearly all Early Byzantine ceramics and non-glazed ceramics were unpopular in Early Byzantine period. The glaze which is used for Byzantine ceramics is leaded-glaze and that glazing material consists of lead-oxide. The lead ratio of ceramics in the elemental composition of glazed surfaces were determined nearly 40 times bigger than the lead ratio of non-glazed surfaces. This result shows that possibility of lead poisoning in this period would be high.

The sulphur (S) content which was detected after analysis an indication of the presence of minerals containing limestone and gypsum in the ceramic samples. Having the lower amount of sulphur in the ceramic samples of 31, 32, 33, 38, 40, and 42 as compared to other ceramic samples, it is an indication that the raw material and resource of these ceramic samples (31, 32, 33, 38, 40, and 42) differ from other ceramic samples.

The content of calcite (CaCO_3) of ceramic samples were different. It was detected that the calcium content in ceramic samples 2, 10, 12, 19, 20 and 24 were quite high.

Magnesium compounds are due to presence of in ceramic structures with the formation of limestone and with the effect of the subsequent alteration of dolomite (CaMgCO_3) and magnesite (MgCO_3). The detected amount of MgO content of ceramics were differ from %1 to %6. This result show that there were different amount of limestone in the structure of ceramics.

It can be said that, during this period (Early Byzantine Period), sintering technique that was still in development and still very low sintering temperatures ($<700^\circ\text{C}$) was common.

The composition of inner self-slip and pigments of the study collection ceramic samples were statistically analyzed by clustering methods and identified of similar characteristic by using Minitab 17.0 statistical program.

Cluster analysis or clustering is the task of grouping a set of objects in such a way that objects in the same group (called a cluster) are more similar (in some sense or another) to each other than to those in other groups (clusters). It is a main task of exploratory data mining, and a common technique for statistical data analysis, used in many fields, including machine learning, pattern recognition, image analysis, information retrieval, and bioinformatics. There are numerous ways in which statistical clusters can be formed. Hierarchical clustering is one of the most straightforward methods. In this study, hierarchical method was chosen as clustering method.

According to statistical analysis and evaluations, six clusters have identified. It was seen that, two ceramics for Cluster 1 and Cluster 2, twelve ceramics for Cluster 3, four ceramics for Cluster 4, two ceramics for Cluster 5 and five ceramics for Cluster 6 categorized themselves and the relationship for each cluster, amongs other clusters and themselves have been shown. After carefully evaluating results, the highest similarity level was found between Ceramic 31 and Ceramic 33 with the %96 ratio. Moreover, Ceramic 30, Ceramic 35 and Ceramic 40 had a triple connection with the similarity of 92% ratio. Ceramic 2 and Ceramic 20 were remarkable clusters which had %94 ratio of similarity. However, in terms of clustering with the 63% ratio of similarity level and the lowest linkage level were Ceramic 11 and Ceramic 32 consisting of Cluster 5.

From the obtained data, raw material compositions and properties, calcination temperature, glazed composition and properties of the ceramic findings were evaluated to clarify the technology and characterizing of the related period.

1. GİRİŞ

İstanbul coğrafi konumu gereği Asya, Yakındoğu ve Anadolu kültürleri ile Avrupa, Balkan ve Trakya kültürleri arasındaki geçiş yolları ve Karadeniz Havzası'nı Ege ve Akdeniz'e bağlayan deniz yolu üzerinde yer alan, tarihin her döneminde farklı kültürlerle ev sahipliği yapan önemli bir yerleşim alanı olmuştur (Kızıltan ve Polat, 2013). Bu süreçlerde, İstanbul ve çevresinde iklimsel ve tektonik değişiklikler olmuş ve çevre uzun bir süre sular altında kalmıştır (Yılmaz ve diğ, 2010).

Yenikapı Neolitik Çağ yerleşmesi, Marmara'nın tatlı su gölü olduğu dönemde kıyıya çok uzak olmayan bugünkü yerinde kurulmuş ve küresel deniz seviyelerinde gerçekleşen yükselme sonucunda sular altında kalmıştır. 4. yüzyıldan 11. yüzyıla kadar aktif olarak kullanılan Eleutherios Limanının I. Constantinus Döneminde kurulduğu kabul edilmektedir. Bu liman, Bayrampaşa Deresi'nin getirdiği mil ve molozlarla dolmaya başlamış, 10. yüzyıldan itibaren küçük gemilerin ve balıkçı teknelerinin uğradığı bir liman olarak da 11. yüzyıla kadar kullanılmıştır. 13. yüzyılda tamamen dolduğu ve üzerinin kapandığı tahmin edilmektedir. 14. yüzyıldan itibaren bostan olarak kullanılmaya başlamıştır (Kızıltan ve Polat, 2013).

Yirminci yüzyılın ikinci yarısında barışçıl amaçlı olarak önemli gelişmeler kaydeden nükleer teknoloji, farklı uygulamalarla hayata geçirilmiş bulunmaktadır. Bu bağlamda, nükleer reaktörlerin gelişiminin yanı sıra birçok nükleer tekniğin de gelişmesi mümkün olmuştur. Nükleer teknikler; endüstri, tıp ve tarım gibi birbirinden farklı alanlarda başarı ile uygulanmaya başlamıştır. Nitekim söz konusu bu teknikler çeşitli araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin yanı sıra, farklı alanlarda rutin uygulama teknikleri olarak da yaygın şekilde kullanılmaktadır (Tuğrul, 1986).

Doğu Roma İmparatorluğu ya da modern literatürdeki adıyla Bizans İmparatorluğu Büyük Constantinus tarafından imparatorluğun başkentinin Yeni Roma olarak Konstantinopolis'e taşınmasıyla fiilen 11 Mayıs 330 yılında kurulmuş ve 29 Mayıs 1453'te Osmanlı Sultanı Fatih Sultan Mehmed'in fethine kadar yaklaşık 1123 yıl varlığını sürdürmüştür. İmparatorluk bu süre içerisinde sadece başkentini

değiştirmemiş aynı zamanda idare sisteminden ekonomiye toplumsal sınıflanmalardan sosyo-kültürel alanlara kadar etkisini gösteren paganlıktan Hristiyanlığa köklü bir din değişimi geçirmiştir. M.S. 391 yılındaki Theodosius ediktiyle Hristiyanlığın resmi din olarak ilan edilmesinden sonra artık paganizmin yoğun olarak yaşandığı Roma İmparatorluğu'nun yerini Hristiyanlaşmış bir Bizans İmparatorluğu almıştır. Bizans İmparatorluğu: Bizans I: Erken Dönem (M.S 323-802), Bizans II: Yükseliş Dönemi (M.S 803-1081) Bizans III: Gerileme ve Çöküş Dönemi (1082-1453) şeklinde 3 döneme ayrılabilir (Bilgiç, 2013).

Nükleer teknikler, arkeometride; eser incelemesi, malzeme belirlemesi, kaynak tayini, yaş tayini, restorasyon-konservasyon amaçlı kullanılmaktadır. Bu amaçlarla ise; radyografik uygulama, analiz ve spektroskopik uygulamalar yapılabilmektedir (Tuğrul, 1986).

Sanat tarihçileri, arkeologlar, restorasyon ve koruma araştırmacıları devamlı olarak bir arkeolojik buluntunun nerede, ne zaman ve kim tarafından yapıldığını araştırmışlardır. Amaç; tarihe ışık tutmak, eski medeniyetlerin sosyal, ticaret ve teknolojik ilişkilerini açıklayabilmektir. Genelde, estetik değerlendirmeler ve kapsamlı arşiv çalışmaları ile soruların cevaplarını bulmaya çalışırlar. Ancak, bazı durumlarda eserler, kökenlerinden farklı yerlerde ele geçerler ve bir kısmı da teknolojik ve estetik kopyalamaya uğramışlardır. Böyle durumlarda sanat ve arkeolojik eserlerin fiziksel özelliklerinin ve kimyasal bileşimlerinin incelenmesi gerekmektedir.

Çanak-çömlek türü arkeolojik eserlerin kaynaklarını belirlemek daha zor olmaktadır. Ana madde olarak kullanılan kil yataklarının çok yaygın ve bol olması, eserlerin yer altında uzun süre kalmaları sonucu; topraktan esere veya eserden toprağa iyon değişimi ile element geçmesi, kaynağın iz element dağılımının homojen olmaması, kilin kum ve benzeri katkı maddesi katıldıktan sonra pişirilmesi kaynak belirlenmesinde istatistiksel değerlendirmeyi gerektirir (Hedges, 1979).

Son yıllarda, XRF tekniği ve nötron aktivasyon analizi, arkeoloji alanında metal süs eşyaları, kaplama eserler, sırlı ve astarlı çanak çömlek parçalarında önemli ölçüde uygulama alanı bulmuştur. Bu bağlamda, yapılan birçok çalışma ile belirli standartlar oluşturulmuş, bu konuda araştırma yapacaklar için önemli bir kaynak haline

getirilmiştir. Bu tezin oluşturulmasında arkeoloji, fizik ve kimya gibi temel disiplinlerde yapılan çalışmalardan yararlanılmıştır.

Kültür yaşamımızda envanter kavramı, gün geçtikçe yaygınlaşan çok önemli bir zorunluluktur. Pek çok uygarlığa ev sahipliği yapan Anadolu gibi bir coğrafyada kültür envanterinin oluşturulması ve değerlendirilmesi çok büyük önem taşımaktadır. Arkeolojinin uygulama alanlarının, pek çok bilim alanındaki bilgi birikimlerindeki gelişmelerin paralelinde ve gereksinimler doğrultusunda geliştirilerek Türkiye'ye arşiv niteliğinde bilgiler kazandıracak yeni çalışmalara ihtiyaç vardır.

Bu nedenlerle bu çalışmada, antik Theododius Limanı kalıntıları altında bulunan, Erken Bizans dönemine ait seramik buluntularının iç astar ve bezemeleri nükleer yöntemler kullanılarak analiz edilmiş, kimyasal kompozisyonları karakterize edilmiş ve istatistiksel analiz metodu kullanılarak; seramikler kökenlerine göre sınıflandırılmaya çalışılmıştır. Elde edilen verilerden; bu bölgede yaşayan insanların günlük hayatlarında kullandıkları malzemeler ve bu malzemeleri üretmekte kullandıkları teknolojilerin aydınlatılması hedeflenmiştir.

2. TEORİK KISIM : RADYASYON BİLİMİ

2.1 Radyasyon ve Radyoaktivite

Radyasyon; parçacık akımı ile veya dalga tabiatına uygun olarak, bir maddeye veya ortama enerji transfer edilmesidir. Bu tanım kapsamında doğal ya da yapay radyoaktif çekirdeklerin kararlı yapıya gelebilmek için dışarı saldıkları hızlı parçacıklar ve elektromanyetik dalga şeklinde taşınan fazla enerjileri de "radyasyon" olarak adlandırılır (Tuğrul, 2013).

Doğadaki elementlerin bazıları kararlı çekirdeğe sahipken, bazıları ise kararsız çekirdeklere sahiptir. Radyoaktivite, kararsız atom çekirdeklerinin nükleer parçacık veya elektromanyetik radyasyon yayınlamaya yaptıkları rastgele (spontaneous) dönüşüm ve bozunum işlemidir.

Radyasyonu tanımlamada üç ana parametre kullanılır:

- Enerjisi (düşük ve yüksek enerjili radyasyon)
- Türü (parçacık radyasyonu ve elektromanyetik radyasyon)
- Kaynağı (doğal ve yapay radyasyon kaynakları) (L'Annunziata, 2007).

2.1.1 Radyoaktif bozunma ve aktivite

Radyoaktif çekirdekler kararsızdırlar ve genellikle enerjitik parçacıklar yayınlamaya farklı çekirdeklere dönüşebilirler. Kendiliğinden olan böyle bir dönüşüme "radyoaktif bozunma" adı verilir. En genel üç radyoaktif bozunma çeşidi vardır. Alfa bozunması; iki proton ve iki nötrondan oluşan ^4He çekirdeğinin yayınlanması olarak bilinir. Beta bozunması; bir elektron ve bir anti nötrino yayını ile çekirdekte bir nötronun bir protona dönüşmesine karşılık gelir. Gama bozunması ise; bir foton yayını ile çekirdeğin uyarılmış bir durumdan daha düşük uyarılmış bir duruma geçmesi olayına denir. Diğer bir deyişle gama bozunması, çekirdeklerin izomerik seviyelerinden taban durumlarına olan bozunma şeklidir. Deneysel gözlemlerden,

radioaktif bozunma kanununun bir olasılığa bağlı olduğu bilinir. Ancak, verilen bir zaman aralığında bozunacak çekirdek sayısı sabit, çekirdeğin yaşından bağımsız ve sadece çekirdeğin kendi fiziksel özelliklerine bağlıdır (L'Annunziata, 2007).

Bu yüzden, verilen bir zaman aralığında orijinal radyoaktif çekirdeklerin sayısı $N(t)$ ise t zamanında;

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.1)$$

kadar çekirdeğin eksildiği bulunur. Burada λ çekirdeğin karakteristiği olan radyoaktif bozunma sabitidir ve birimi zamanın tersidir. Eğer ilk çekirdek sayısı N_0 ise; herhangi bir t zaman sonundaki mevcut çekirdek sayısı;

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

ifadesiyle verilecektir.

Çekirdek bozunma hızı aktivite olarak adlandırılır ve

$$A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

şeklinde verilir.

Burada ;

N : Radyoaktif çekirdek sayısı

N_0 : Başlangıç çekirdek sayısı

$A(t)$: Son aktivite

λ : Bozunum sabiti

t : Zaman olarak tanımlanmaktadır.

Aktivitenin klasik birimi curie (Ci)'dir. $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ parçacık/saniye olarak ifade edilmektedir. Bu ifade, 1 gram saf ^{226}Ra aktivitesine karşılık gelmektedir. Her ne kadar "Curie" literatürde hala geniş bir kullanım alanına sahip ise de yerini yavaş yavaş aktivitenin SI birim sistemindeki karşılığı olan Becquerel'e bırakmaktadır (Turner, 1995).

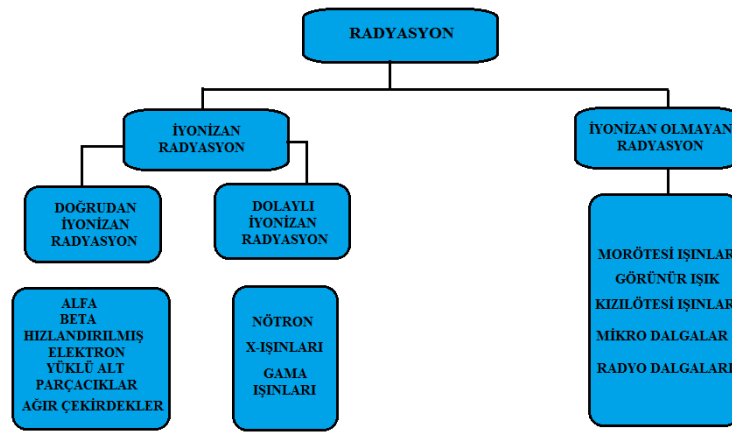
Becquerel (Bq), 1 saniyedeki parçalanma sayısı olarak tanımlanmaktadır.

$$1 \text{ Bq} = 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci} \quad (2.4)$$

2.1.2 Radyasyonun sınıflandırılması

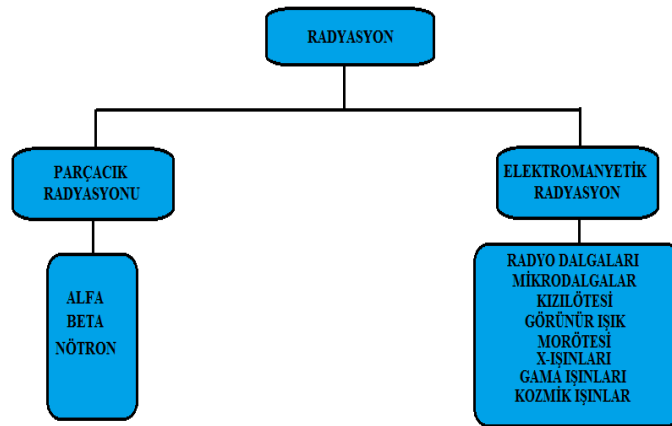
Radyasyon, madde içerisinden geçerken iyonizasyon yapması, diğer bir deyişle iyon çiftleri oluşturması durumunda "iyonizan radyasyon"; etkileştiği materyal içindeki

atomları, yeteri kadar enerjisi olmadığı için iyonize edemediği ve sadece uyarmakla kaldığı durumunda ise “iyonizan olmayan radyasyon” olarak tanımlanır. İyonizan radyasyon çeşitleri; alfa, beta, gama ve X-ışınları’dır. Mikrodalgalar, görünür ışık, radyo dalgaları, kızılötesi ve (çok kısa dalga boyluları hariç olmak üzere) morötesi ışınlar iyonize olmayan radyasyona örnektir (Şekil 2.1). Elektromanyetik spektrumu oluşturan bütün radyasyonlarda; enerji, yüksüz ve kütsüz fotonlar tarafından taşınmaktadır. Eğer iyonize edici elektromanyetik radyasyon çekirdekten yayınlanıyorsa gama, yörüngeden yayınlanıyorsa X-ışını adını alır (L’Annunziata, 1998).



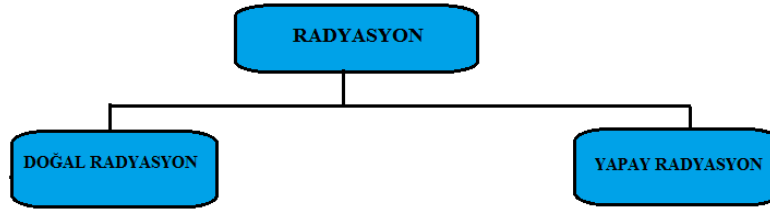
Şekil 2.1 : Radyasyonun enerjisine göre sınıflandırılması (Tuğrul, 2013).

Radyasyon, türüne göre; parçacık radyasyonu ve elektromanyetik radyasyon olarak sınıflandırılmaktadır. Parçacık radyasyonu; alfa, beta ve nötronlar belli bir kütleyle sahiptirler. Alfa parçacıkları, yükleri ve kütleleri sebebiyle madde ile etkileşmelerinde enerjilerini çabuk kaybetmekte, bu sebeple giricilikleri ve menzilleri oldukça küçük olmaktadır. (Şekil 2.2) (Tuğrul, 2013).



Şekil 2.2 : Radyasyonun türüne göre sınıflandırılması (Tuğrul, 2013).

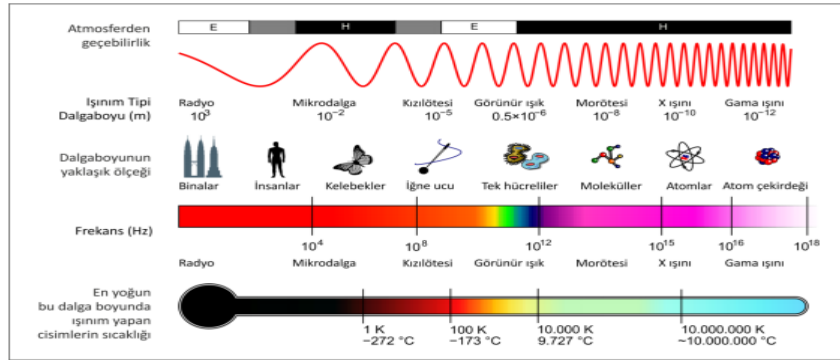
Radyasyon kaynağına göre, doğal radyasyon ve yapay radyasyon olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Radyasyonun kaynağına göre sınıflandırılması (Tuğrul, 2013).

2.1.3 Elektromanyetik spektrum

Elektromanyetik tayf veya elektromanyetik spektrum (EMS), evrenin herhangi bir yerinde fizik kurallarınca mümkün kılınan tüm elektromanyetik radyasyonu ve farklı ışınım türlerinin dalga boyları veya frekanslarına göre bu tayftaki rölatif yerlerini ifade eden kavramdır (Şekil 2.4). Herhangi bir cismin elektromanyetik tayfı veya spektrumu, o cisim tarafından çevresine yayılan karakteristik net elektromanyetik radyasyonu tabir eder. Elektromanyetik spektrumun bölgelere ait; dalgaboyu, frekans ve enerji değerleri Çizelge 2.1’de verilmektedir (Url-1).



Şekil 2.4 : Elektromanyetik spektrum (Seyrek, 2013).

Çizelge 2.1 : Elektromanyetik spektruma ait bilgiler (Seyrek, 2013).

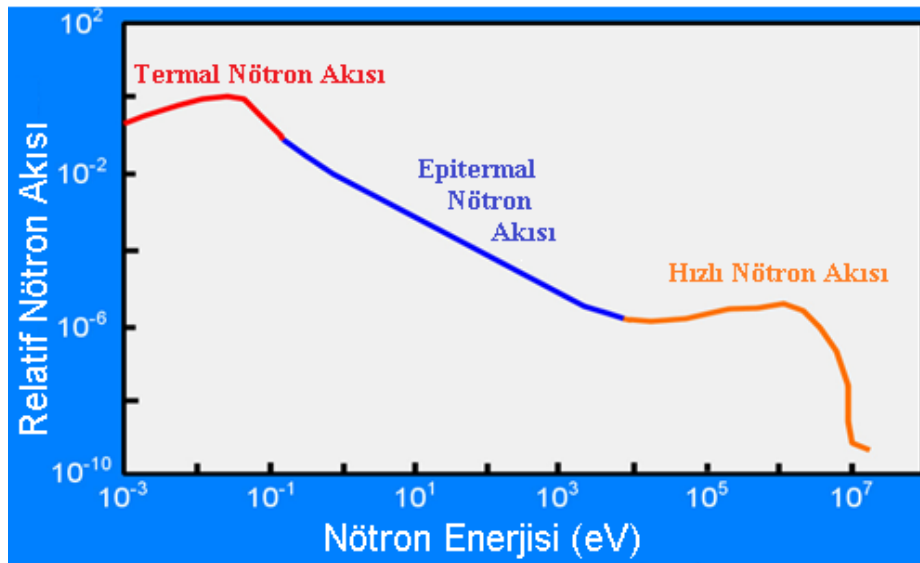
Bölge	Dalga Boyu	Frekans (Hz)	Enerji (eV)
Radyodalgaları	1m	300×10^6	1.24×10^{-6}
Mikro dalgalar	1m-1mm	$300 \times 10^6 - 300 \times 10^9$	$1.24 \times 10^{-6} - 1.24 \times 10^{-3}$
Kızıl ötesi	1mm-750mm	$300 \times 10^9 - 400 \times 10^{12}$	$1.24 \times 10^{-3} - 1.65$
Görünür bölge	750nm -400nm	$400 \times 10^{12} - 750 \times 10^{12}$	1.65-3.1
Ultraviyole bölge	400nm - 12nm	$750 \times 10^{12} - 24 \times 10^{15}$	3.1-100
X-Işınları	12nm > ...	$24 \times 10^{15} < ...$	$100 < ...$

2.2 Radyasyon Ailesi İçinde Nötronlar

Nötronlar, yalnızca atom çekirdekleri sınırlarında kararlı olan nötral bir parçacıktır. Radyasyon ailesi içinde parçacık radyasyon grubuna girmektedirler. Kütlesi, protonun kütlesine eşit olup “1 atomik kütle birimi” dir. Nötronlar, alfa ve beta radyasyonları gibi klasik nükleer bozunma işlemlerinde büyük miktarlarda yayılmazlar. Çekirdek ile partiküler radyasyon arasındaki reaksiyonların akabinde, nötronun atom çekirdeğinden fırlatılması ile önemli miktarlarda nötron radyasyonu açığa çıkar. Nötronun yüksüz olması, alfa ve betalar gibi malzemelerde direk iyonizasyon etkisini olanaksız hale getirmektedir. Nötronlar, çoğunlukla kinetik enerjilerine göre sınıflandırılırlar (Çizelge 2.2). Bu sınıflandırmalar yapılırken, nötron çeşitleri arasında çok keskin bölge veya enerji sınırı yoktur. Nötronlara ait relatif enerji-akı grafiğinin nötron çeşitlerine göre değişimi, Şekil 2.5’te verilmektedir (L’Annunziata, 1998).

Çizelge 2.2 : Nötronların sınıflandırılması (Şenyiğit, 2011).

Nötronlar	Enerji Aralığı	Dalga boyu ($\text{\AA}^0$)	Hız (m/s)
Ultra Soğuk	$\leq 300 \text{ neV}$	≥ 500	≤ 8
Soğuk	0.12 meV-12meV	26.1- 2.6	152 -1515
Termal	12 meV - 100 meV	2.6 - 0.9	1515 - 4374
Epitermal	100 meV - 1 eV	0.9 - 0.28	4374 – 13.8 e3
Orta	1 eV – 0.8 MeV		
Hızlı	$> 0.8 \text{ MeV}$		



Şekil 2.5 : Nötronların enerji-relatif akı grafiği (Url-2).

2.2.1 Nötronların madde ile etkileşimi

Nötronlar yüksüz parçacıklar olduklarından, diğer yüklü nükleer parçacıklarla karşılaştırıldığında; nüfuz edilmesi zor atomik elektron bariyerini aşabilirler ve atomların çekirdekleriyle çarpışarak saçılabilir veya atom çekirdekleri tarafından soğrulabilirler. Çekirdek içerisine giren nötronlar çekirdeğin özelliklerine ve nötron enerjisine göre çeşitli reaksiyonlar yapabilirler (Şahin, 2014).

Nötronlar enerjilerine bağlı olarak bir çok etkileşmeye meydana getirirler.

Bu etkileşimler genel olarak:

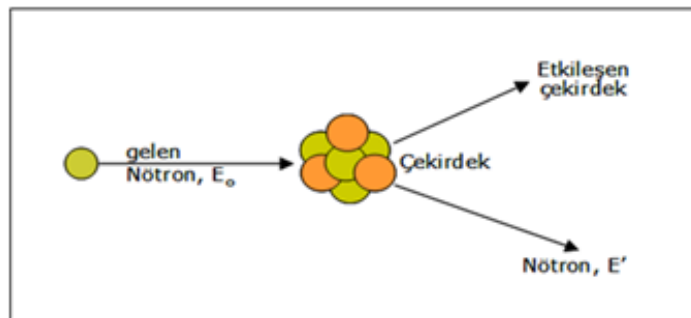
- Saçılma etkileşimleri
 - Esnek (elastik) saçılma
 - Esnek olmayan (inelastik) saçılma
- Soğurma (absorbsiyon) etkileşimleri

şeklinde sınıflandırılabilir (L'Annunziata, 1998).

2.2.1.1 Saçılma etkileşimleri

Elastik saçılma

Nötronların atom çekirdekleriyle çarpışmaları sonucu meydana gelen elastik saçılma, bir bilyardo topunun diğer bir bilyardo topuyla çarpışmasına benzemektedir. Nötronun bir atom çekirdeğine çarpması ve kinetik enerjisinin bir miktarını ona aktardıktan sonra kendisinin geliş doğrultusundan farklı bir doğrultuda saparak çekirdekten uzaklaşması mantığına dayanır (Şekil 2.6). Elastik saçılma, hızlı nötronların düşük atom numaralı atom çekirdekleriyle (hidrojen, parafin, döteryum vb.) etkileşimlerindeki temel enerji kaybetme mekanizmasıdır. İki çarpışan parçacığın toplam kinetik enerjisi korunur (L'Annunziata, 1998).



Şekil 2.6 : Nötronun bir çekirdekten elastik saçılması (Şahin, 2014).

Elastik saçılma sonrası nötronun kinetik enerji kaybı;

$$E_k = \frac{4M m_n}{(M+m_n)^2} \cos^2 \beta \quad (2.5)$$

ifadesi ile verilir (Bacon, 1969).

Burada;

E_k : Nötronun kinetik enerji kaybı.

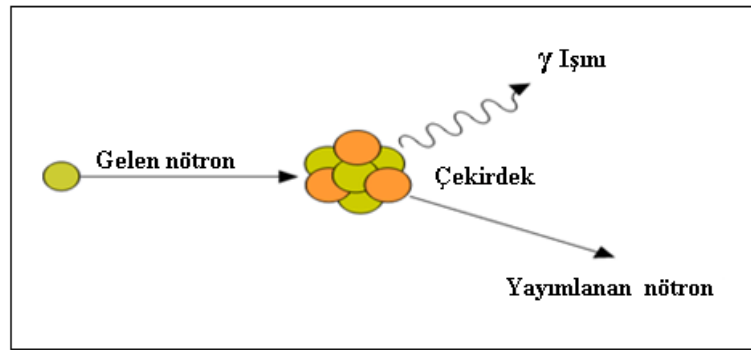
M : Çekirdeğin kütlesi.

m_n : Nötronun kütlesi.

β : Çekirdeğin sapma açısı olarak verilmektedir.

İnelastik Saçılma

Nötronların inelastik saçılması, çoğunlukla hızlı nötronların atom numarası büyük bir çekirdek ile çarpışması durumunda meydana gelir (Şekil 2.7). Bu çekirdek enerjisini direk gama ışını olarak kaybedebileceği gibi; belli bir süre uyarılmış, metastabil durumda da kalabilir. Bu yüzden inelastik saçılmada, saçılan nötron ve geri tepen çekirdek arasında momentum korunumu olmaz. İnelastik saçılma reaksiyonları, hızlı nötronlar ve orta (intermediate) nötronların, termal enerji seviyelerine yavaşladıkları saçılma mekanizmalarıdır (L'Annunziata, 1998).



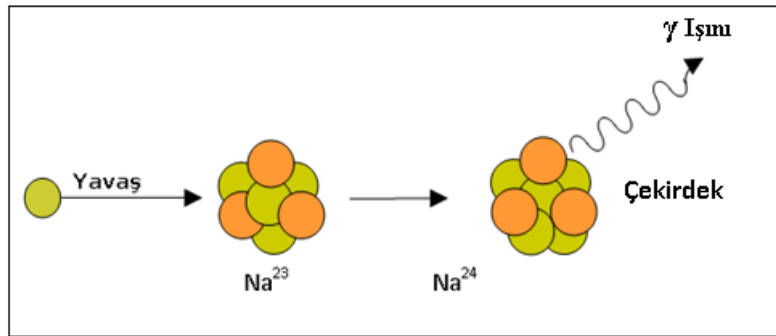
Şekil 2.7 : Nötronun inelastik saçılması (Şahin, 2014).

2.2.1.2 Soğurma etkileşimleri

Nötronların çekirdek ile etkileştikten sonra çekirdekten başka parçacıkların atılması olayına soğurma etkileşimi adı verilmektedir. Soğurma etkileşimleri başlıca: (n,γ) , (n,α) , $(n,2n)$, (n,p) gibi reaksiyonlardır (L'Annunziata, 1998).

Nötron yakalanması

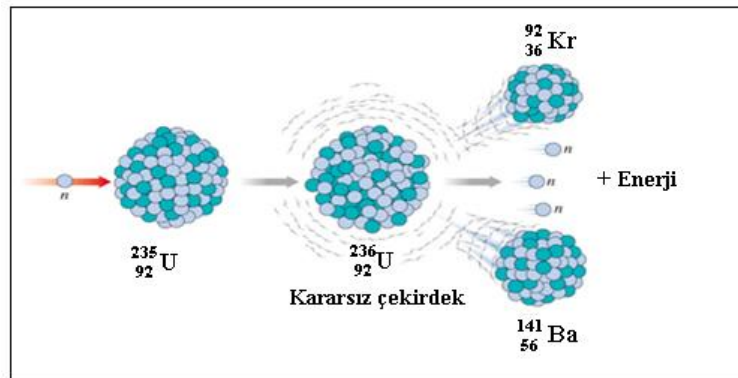
Nötron yakalanması, yavaş nötronların maddeyle etkileşimlerinde ana etkileşim olarak anılır (Şekil 2.8). Bir çekirdeğin nötronu yakalayama gücü, çekirdeğin çeşidi ve nötronun enerjisine bağlıdır. Daha öncede belirtildiği gibi nötron yakanlaması tesir kesiti (barn), bir çekirdeğin nötronu soğurma gücünün ölçülmesi için kullanılır. Nötron yakalanması için tesir kesiti $1/v$ ile değişir. Burada, v nötronun hızıdır. Bu sebeple, düşük enerjilerde nötron yakalanma olasılığı yükselir (L'Annunziata, 1998).



Şekil 2.8 : Nötron yakalanması (Şahin, 2014).

Nükleer Filyon

Nötronların fisil veya fisil olabilir bir çekirdekle etkileşmesi ve bu çekirdeğin kararsız hale gelerek adeta titreşen damlacık gibi “filyon bileşenleri” adı verilen iki çekirdek şeklinde ayrılması olayıdır (Şekil 2.9). Bu olayda aynı anda birden fazla nötron ve yüksek seviyede enerji açığa çıkar (~ 194 MeV). Doğal uranyum (^{235}U) ile yapay uranyumun (^{233}U) ve (^{239}Pu)’un filyonu termal nötron enerjisi seviyesinde optimum iken, (^{238}U) ve (^{232}Th)’nin filyonu, enerjileri en az 1 MeV olan nötronlar gerektirir (L'Annunziata, 1998).



Şekil 2.9 : Filyon olayı (Şahin, 2014).

Özet olarak; nötronların madde ile etkileşmesi için toplam olasılık, bu ayrı ayrı etkileşmelerin tesir kesitlerinin toplamıdır (L'Annunziata, 1998).

2.2.2 Nötron tesir kesiti

Verilen herhangi bir element, nötron tarafından bombardıman edildiğinde, belli bir nükleer reaksiyon, belli bir olasılıkla meydana gelmektedir. Bu olasılık; her radyoizotop için ve her nükleer reaksiyon için belli şartlarda birbirinden farklıdır ve reaksiyon o izotop ve şartlar için belirli bir değer alır. Bu olasılık değeri tesir kesiti (cross section) olarak adlandırılır (Tuğrul, 2013).

Tesir kesitinin boyutu (uzunluk)² veya barn (b)'dır. Bir çok radyonüklit, düşük enerjili (termal) nötronlarda en yüksek tesir kesitine değerine sahipken; bazı radyonüklidler ise yüksek enerjili (epitermal) nötronlar için en yüksek tesir kesiti değerine sahiptir (Url-2).

2.2.3 Nötron kaynakları ve eldesi

Nötronlar çok kısa yarı ömürlerinden dolayı doğada serbest halde bulunamazlar. Yapay olarak elde edilmeleri gerekir. Bunun için çeşitli reaksiyonlar kullanılır. Nükleer reaktörler en bilinen nötron kaynaklarındandır. ²³⁵U' un fisyonundan, enerjileri birkaç keV'den 10 MeV ve üzeri enerjili nötronlar elde edilebilir. Bu reaksiyonlarda hedef çekirdek alfa, proton, döteron ile bombardıman edilerek uyarılmış birleşik çekirdek elde edilir. Eğer uyarılma enerjisi, birleşik çekirdek içindeki son nötronun bağlanma enerjisinden daha büyükse, bu durumda nötronun yayınlanması olasıdır. Geri kalan uyarılma enerjisi nötron ve kalan çekirdek arasında paylaşılır. Kalan çekirdek uyarılmış durumda bir süre kalabilir. Sonra gama ışını yayımlayarak taban düzeyine geçer (Turner, 1995).

Nötron kaynaklarını incelemek için önce son nötronun bağlanma enerjisini düşünmek gerekir. Alfa parçacıklarının birleşerek oluşturduğu düşünülen çekirdeklerin ayrılma enerjileri büyüktür ve bu çekirdekler çok kararlıdır (Be-8 hariç; C-12, He-4, O-16 vb.). Hafif çekirdekler için bağlanma enerjisi; 2-20 MeV, orta ağırlıkta çekirdekler için 7-10 MeV, ağır çekirdekler için 6-7 MeV civarındadır. Nötronu elde etmek için hafif çekirdekler kullanılır. Çizelge 2.3'te (alfa, nötron) kaynaklarına ait bazı özellikler verilmektedir (Şenyiğit, 2011).

Temel nötron kaynakları şu şekilde listelenebilir:

- Radyoaktif nötron kaynakları
- (Alfa, nötron) kaynakları
- (Gama, nötron) kaynakları
- Hızlandırılan yüklü parçacıkların reaksiyonu
- Kendiliğinden fisyon (Şenyiğit, 2011).

Çizelge 2.3 : Be (α ,n) nötron kaynaklarının karakteristikleri (Şenyiğit, 2011).

Kaynak	Yarıömür	E_a (MeV)	Birincil Alfa Parçacıkları		$E_a < 1.5$ MeV ile Yüzde Ürün	
			Hesaplanan	Deneysel	Hesaplanan	Deneysel
$^{239}\text{Pu}/\text{Be}$	24000y	5.14	65	57	11	9-33
$^{210}\text{Po}/\text{Be}$	138 g	5.30	73	69	13	12
$^{238}\text{Pu}/\text{Be}$	87.4 y	5.48	79	-	-	-
$^{241}\text{Am}/\text{Be}$	433 y	5.48	82	70	14	15-23
$^{244}\text{Cm}/\text{Be}$	18 y	5.79	100	-	18	29
$^{242}\text{Cm}/\text{Be}$	162 d	6.10	118	106	22	26
$^{239}\text{Ra}/\text{Be}+\text{kız}$ çekirdekleri	1602 y	Çoklu	502	-	26	33-38
$^{239}\text{Ra}/\text{Be}+\text{kız}$ çekirdekleri	216 y	Çoklu	702	-	28	38

2.3 Radyasyon Ailesi İçinde Nötronlar

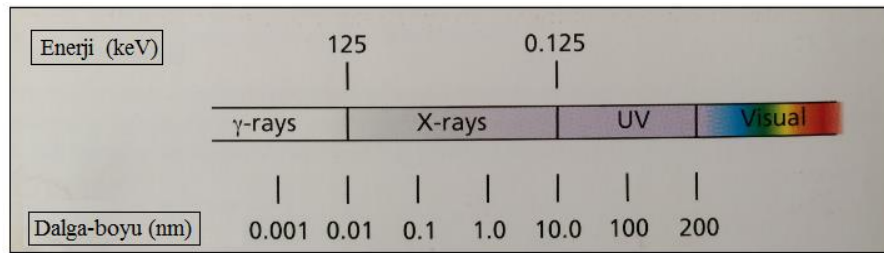
2.3.1 X-ışınlarının Keşfi

X-ışınları, Roentgen tarafından 1895’de bulundu. Roentgen varlığını ve etkilerini görüp, mahiyetini anlayamadığı bu ışınları “X-ışınları” adını vermiştir. Roentgen bir katot ışını tüpünü çalıştırdığında, belli mesafede bulunan baryum platin siyanürlü bir ekranın üzerinde garip bir floresans (parlama) ışımının oluştuğunu görmüş ve tüp ile ekran arasına çeşitli kalınlıklarda maddeler koyarak deneyleri sürdürmüştür. Sonuçta floresansın zayıfladığını fakat kaybolmadığını fark etmiştir. Deneyler sırasında bu ışınların fotoğraf filmlerini etkilediğini ve gazları iyonlaştırdığını da gözlemlemiştir. Roentgen, gözle görülemeyen bu ışınları X-ışını adını vermiştir. Bu önemli buluşundan ötürü Roentgen’e 1896 yılında Londra’da Kraliyet Derneği’nin Rumford

Madalyası verilmiş, 1901 yılında da Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmıştır (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).

2.3.2 X-ışınlarının genel özellikleri

X-ışınları elektromanyetik spektrumda ultraviyole ışınları ile gama ışınları arasında yer alır (Şekil 2.10). Dalga boyları (10^{-5} – 100)Å° arası olan elektromanyetik radyasyon olarak tarif edilen X-ışınları, yüksek enerjili elektronların yavaşlaması ve/veya atomların iç yörüngelerindeki elektron geçişleri ile oluşurlar (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).



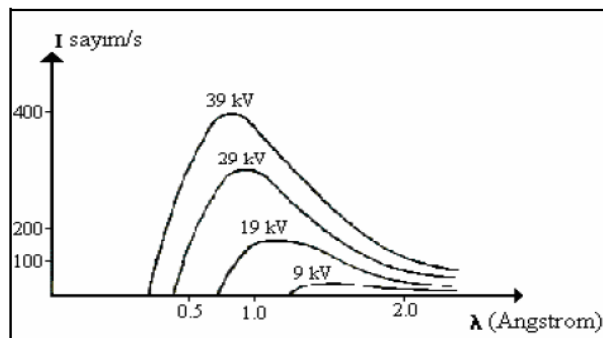
Şekil 2.10 : X-ışınları ve diğer elektromanyetik radyasyonlar (Brouwer, 2006).

2.3.3 X-ışınlarının çeşitleri

Etkileşme şekline göre, sürekli (Frenleme) X-ışını ve karakteristik X-ışını olmak üzere iki tür X-ışını elde edilir.

2.3.3.1 Sürekli (Frenleme tipi) X-ışınları

Hedefe gelen yüksek hızlı elektron, atomun çekirdeğine yaklaşırken elektronun negatif yükü ile çekirdeğin pozitif yükü etkileşir ve çekirdeğe doğru bir sapma olur. Sapan elektronun hızı dolayısı ile enerjisi azalmış olur. Bu enerji azalması sürekli X-ışını (Bremsstrahlung) olarak ortaya çıkar. Sürekli X-ışınlarına ait dalgaboyu-sayım grafiği Şekil 2.11'de verilmektedir (Koç, 2009).



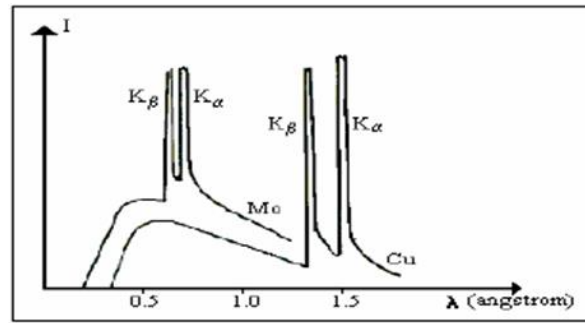
Şekil 2.11 : X-ışınlarına ait dalgaboyu-sayım grafiği (Koç, 2009).

Bu ışınlar sürekli denmesinin sebebi ise enerji spektrumlarının sürekli olmasındandır. Sürekli X-ışınlarının enerji aralığı hemen hemen, sıfır ile yüksek hızlı elektronun maksimum enerjisi arasındadır. Sürekli X-ışını spektrumları geniş bir frekans aralığını kapsayan sürekli bir ışıma karşılık gelmektedir. Bu nedenle sürekli X-ışınlarına “beyaz X-ışınları” denir (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).

2.3.3.2 Karakteristik X-ışınları

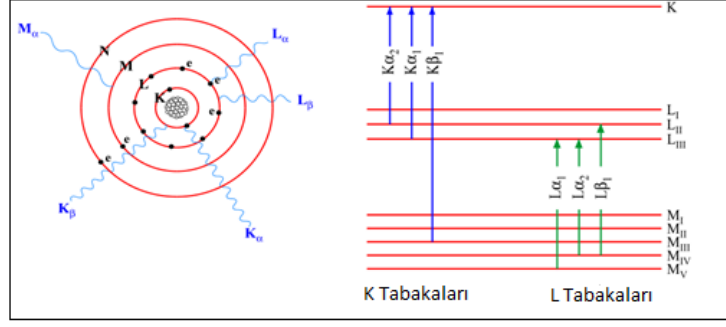
Hedef atom üzerine gönderilen elektronların, hedef atomun yörüngesindeki elektronlarla etkileşimi sonrasında, aldıkları enerjiyle üst enerji seviyelerine çıkarlar. Kararsız durumdaki bu enerji seviyeleri geri bozunduğunda, dışarıya foton yayınlanır. Enerjileri, seviyeleri arasındaki farka eşit olan bu fotonlara karakteristik X-ışınları adı verilir (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).

Karakteristik X-ışınlarının enerjisi bombardıman elektronunun enerjisi ile tayin edilmez. Karakteristik X-ışınlarının enerjisi, bir orbital elektronunun bir yörüngede bulunan boşluğu doldururken verdiği enerjidir. Herhangi bir yolla bir atomdan elektron koparılsa veya daha üst enerji seviyelerine çıkarılırsa atom uyarılmış olur.



Şekil 2.12 : Karakteristik X-ışını spektrumu (Koç, 2009).

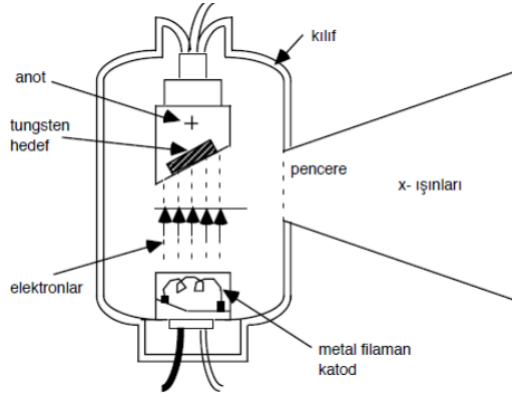
Bu uyarma genellikle, hızlandırılmış elektronlarla, X-ışını tüpünden yayınlanan X-ışınları ile radyoizotop kaynaktan yayınlanan fotonlarla, proton, nötron ve alfa parçacıklarıyla, sekonder X-ışınları ile gerçekleştirilir. Bu yöntemlerden biriyle atomun herhangi bir tabakasından koparılan elektronun yerine çok kısa bir zaman içerisinde üst tabakalardan bir elektron geçişi olur (Şekil 2.13). Bu geçiş sırasında bir foton yayımlanır. İç tabakalar arasındaki elektron geçişinden yayımlanan bu fotona, o elementin karakteristik X-ışını fotonu denir. Şekil 2.12'de K tabakasına ait karakteristik X-ışını grafiği verilmiştir (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).



Şekil 2.13 : Yörünge geçişleri (Url-5).

2.3.4 X-ışını tüpü

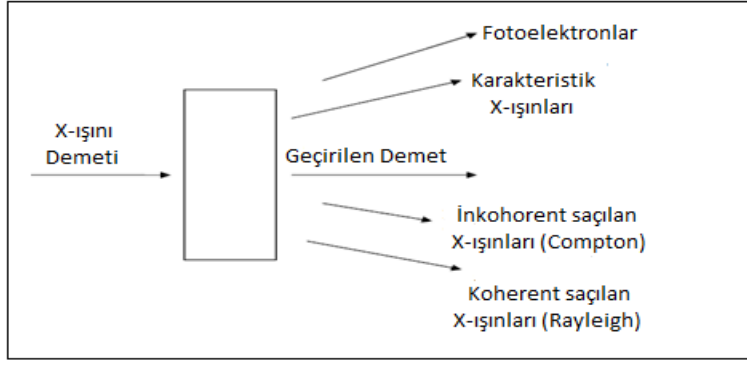
X-ışını tüpü yüksek voltajlı bir katot ışını tüpüdür. Tüp yüksek vakumda havası boşaltılmış cam bir kılıftan oluşmuştur (Şekil 2.14). Bir ucunda anot (pozitif elektrot), diğer ucunda katot (negatif elektrot) bulunur. Katot, ısıtıldığında elektron salan, tungsten materyalinden yapılmış bir flamandır. Anot, kalın bir çubuk ve bu çubuğun sonundaki metal hedeften oluşur. Anot ve katot arasına yüksek voltaj uygulandığında katot flamanda elektron yayınlanır. Bu elektronlar, yüksek gerilim altında anoda doğru hızlandırılır ve hedefe çarpmadan önce yüksek hızlara ulaşır. Yüksek hızlı elektronlar, metal hedefe çarptıklarında enerjilerini aktararak foton yayınlanır. Oluşan X-ışını demeti cam zarfın içindeki ince cam pencereden geçer. Bazı tüplerde uygun dalga boylu X-ışını elde etmek için filtreler kullanılır (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).



Şekil 2.14 : X-ışını tüpü (Arslan, 2010).

2.3.5 X-ışınlarının madde ile etkileşmesi

Fotonlar madde içinden geçerken atomların çekirdekleri ya da yörünge elektronları ile etkileşirler. Etkileşimde rol oynayan en önemli olaylar fotoelektrik soğurma, koherent saçılma, compton saçılması ve çift oluşumudur (Şekil 2.15).

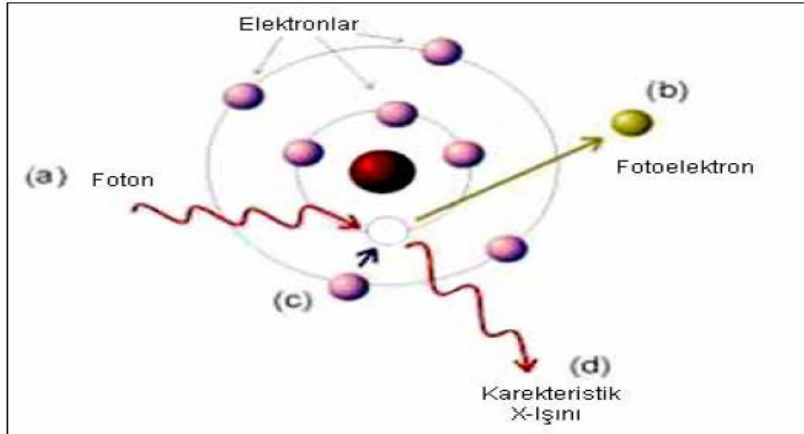


Şekil 2.15 : X-ışınlarının madde ile etkileşmesi (Koç, 2009).

Bu olaylar sonucunda foton ya soğurulur veya enerjisinin bir kısmını maddede bırakarak saçılır ya da hiç enerji bırakmadan orijinal yönünden sapar (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).

2.3.5.1 Fotoelektrik etki

Düşük enerjili bir foton genellikle içinden geçtiği ortamdaki atomların K veya L yörüngesindeki bir elektrona bütün enerjisini vererek onu pozitif yüklü çekirdeğin bağlayıcı kuvvetinden kurtarır. Dışarıya fırlatılan bu elektrona “foto elektron” denir. Bu olay neticesinde oluşan elektron boşluğu dış yörüngedeki başka bir elektron tarafından doldurulur ve bu sırada X-ışını yayınlanır (Şekil 2.16). 0.5 MeV’den daha küçük enerjili fotonların ağır elementler tarafından soğurulmasında bu olay oldukça önemlidir (Chopin ve diğ, 2002).



Şekil 2.16 : Fotoelektrik etki şematik gösterimi (Seyrek, 2007).

Bu olay sırasında gelen fotonun enerjisinin bir kısmı elektronu bağlı olduğu atomdan koparabilmek için harcanır, geri kalan kısmı ise koparılan elektrona kinetik enerji olarak aktarılır.

$$E_{\gamma} = h\nu = I_B + K_e \quad (2.7)$$

Burada ;

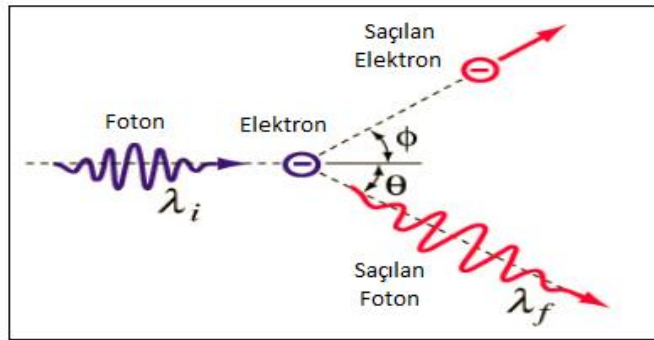
E_{γ} : Gelen fotonun enerjisi.

I_B : Elektronu bulunduğu yerden koparabilmek için gerekli olan bağ enerjisi.

K_e : Kopan elektronun kinetik enerjisini temsil etmektedir (Chopin ve diğ, 2002).

2.3.5.2 Compton saçılması

Atoma gevşek olarak bağlanmış bir dış yörünge elektronu, enerjisi kendisine kıyasla çok daha büyük olan bir fotonla çarpışması sonucunda meydana gelen olaya “Compton Saçılması” denir. Elektron kütleli bir parçacık olduğu için fotonun bütün enerjisini soğurması, momentumun korunumu gereği mümkün değildir. Dolayısıyla foton, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır saçılma uğrayarak yoluna devam eder (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 : Compton saçılması şematik gösterimi (Seyrek, 2007).

Foton ile elektron arasında oluşan açı fotonun enerjisine bağlıdır. Gelen fotonun dalga boyu ile saçılan fotonun dalga boyu arasındaki fark;

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = h/m_0c (1 - \cos\theta) \quad (2.8)$$

$\Delta\lambda$: Gelen fotonun dalga boyu ile saçılan fotonun dalgaboyu arasındaki fark

λ : Gelen fotonun dalga boyu

λ' : Saçılan fotonun dalga boyu

m_0 : Elektronun durgun kütlesi

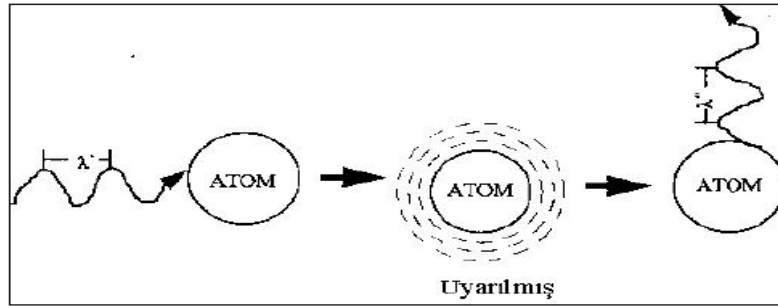
c : Işık hızı

θ : Saçılma açısı

bağıntısı ile ifade edilir. Buradaki h/m_0c “compton dalga boyu” olarak adlandırılır. Enerjileri 0.5-2.0 MeV arasında olan fotonların hafif elementlerden oluşan ortamlar tarafından soğurulmasında bu olay diğerlerine göre daha önemlidir. Yüksek enerjili fotonlar enerjileri belirli bir seviyeye düşene kadar, compton saçılımına uğrarlar. Bu andan sonra da fotoelektrik olayla soğurulurlar. Çünkü; compton saçılımı ile fotonlar tamamen soğurulamazlar (Chopin ve diğ, 2002).

2.3.5.3 Rayleigh saçılması

Rayleigh saçılmasında etkileşme atomun tüm elektronları ile olur. Düşük enerjili radyasyon bir atomun elektronlarıyla etkileşirse onları kendi frekansında titreştirmeye başlar. Titreşen elektronlar ivmeli hareket yaptıklarından radyasyon yayar ve sonuçta atom eski kararlı haline geri döner. Etkileşmenin bu tipinde iyonizasyon oluşmaz, çünkü bir iyon çiftinin oluşabilmesi için, atoma enerji transferi gerekir. Rayleigh saçılmasında enerji transferi yoktur. Yalnızca gelen radyasyonun yönü değişir (Şekil 2.18). Gelen fotonun saçıldıktan sonraki frekansı değişmez (Chopin ve diğ, 2002).



Şekil 2.18 : Rayleigh saçılması şematik gösterimi (Ender, 2006).

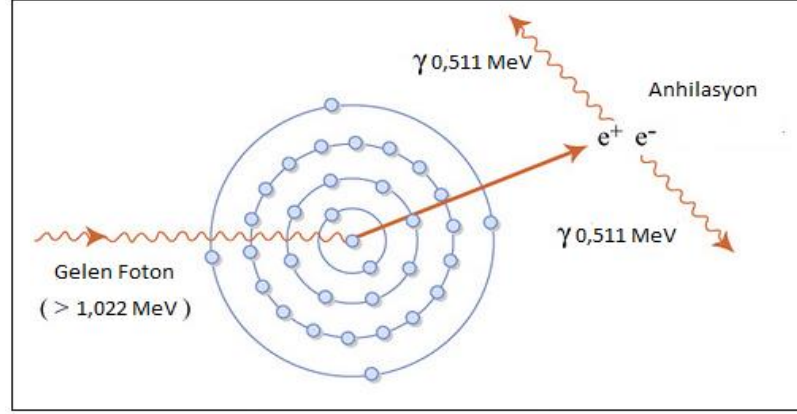
2.3.5.4 Çift oluşumu

Yüksek enerjili bir foton, atom çekirdeğinin yakınından geçerken soğurulabilmekte ve zıt elektrik yüklü parçacıklar olan elektron pozitron çiftinin oluşumuna sebep olabilmektedir. Bu olaya “çift oluşumu” adı verilmektedir.

$$h\nu = m_e^+ + m_e^- + T_e^+ + T_e^- \quad (2.9)$$

Teorik olarak böyle bir çift oluşumunun meydana gelebilmesi için, Dk. 2.9’a göre fotonun enerjisinin en az $2 \times 0.511 = 1.022$ MeV olması gerekir. Foton enerjisinin daha büyük olduğu durumlarda ise bu enerjinin artakalan kısmı elektron ve pozitrona kinetik enerji olarak aktarılır. Oluşan elektron, atomla serbest elektronlar gibi

etkileşirken, pozitron ise bir yörünge elektronu ile birleşir ve zıt yönlü iki foton salarak yok olur (Şekil 2.19). Bu foton ise fotoelektrik yolla soğurulur. Pratikte çift oluşumu 2 MeV'den daha büyük enerjili fotonlar ve ağır elementler için göreceli olarak daha baskındır (Martin, 2006).



Şekil 2.19 : Çift oluşumu şematik gösterimi (Martin, 2006).

3. NÜKLEER TEKNİKLER İLE ARKEOMETRİK ANALİZLER

3.1 Arkeolojik Eserlerde Element Analiz Yöntemleri

Araştırmalarda arkeolojik buluntuların kimyasal bileşimlerinin tespitinde tahribatsız yöntemlerin kullanılması çok büyük önem taşır. Tahribatsız yöntemlerden en çok bilinenler, X-ışını floresans spektrometresi (XRF), nötron aktivasyon analizi (NAA), proton uyarmalı X-ışını analizi (PIXE)'dir (Ender, 2006).

3.2 Nötron Aktivasyon Analizi

3.2.1 Nötron aktivasyon analizi ve temel bilgiler

Nötron aktivasyon analizi (NAA), çekirdeğin nötronlarla ışınlanarak radyonüklid oluşturulması ve ikincil olarak meydana gelen gama ışınlarının değerlendirilmesi esasına dayanan bir aktivasyon analiz tekniğidir. NAA'da, hedef çekirdeğin bir nötron absorbe etmesi, çok yüksek miktarda bir enerji birikimine neden olacaktır. Çekirdek, bu enerji fazlalığından dolayı, bir gama ışını, bir proton veya bir alfa parçacığı yayınlamaya başlayacaktır. Hedef çekirdeğe gönderilen nötronların enerjisi meydana gelecek nükleer reaksiyonun çeşidini, dolayısıyla oluşacak aktivasyon ürünlerini değiştirecektir. Termal nötronlarla etkileşme sonucu oluşacak ana reaksiyon (n,γ) reaksiyonudur (Parry, 1991).

NAA'da duyarlılık; ışınlama süresine, ışınlayan parçacıkların sayısına, reaksiyon tesir kesitine, reaksiyona giren izotopun bolluğuna, ölçülen aktivitenin yarı ömrüne ve ölçümlerin verimine bağlıdır. Tesir kesitleri de parçacık enerjisi ve reaksiyon türü ile değiştiğinden uygun reaksiyonlar seçerek bir numune içindeki saptanacak elementleri aktiflemek, diğerlerinin aktiflenmesini ise kısmen veya tamamen önlemek mümkündür (Meriç, 1990).

Nötron aktivasyon analizinde madde miktarını saptamak için daha çok oluşan aktivitenin gama spektrumları kullanılır. Ölçüm işlemleri,

- nitel
- nicel

olmak üzere iki basamakta gerçekleştirilir.

Nitel çözümleme ile numune içinde ışınlama sonucu oluşan elementler, yarı ömürleri ve yaydıkları ışınların enerjileri yardımıyla saptanır. Kimyasal ayrımın yapıldığı durumlarda (gama) enerji spektrumları karışık olabilir. NAA'da ölçümlerin güvenilir olması için bazı noktalara dikkat etmek gerekir. Birden fazla kararlı izotopu olan elementler birçok aktif izotopun oluşumuna neden olabilir. Hedef maddede birden fazla elementin olduğu durumlarda ise, kimyasal ayrım yapılmadıkça girişim olayları gözlenebilir. Işınlama zamanının ayarlanması ile istenmeyen bazı aktivitelerden kurtulmak mümkündür. Bu reaksiyon tesir kesitine ve oluşan aktivitenin yarı ömrüne de bağlıdır. Ayrıca, uygun bir sayma tekniği ile karakteristik radyasyonların enerjisi ve bozunma biçimi açığa çıkarılabilir. Bilinen yarı ömür de bu bilgilere eklendiğinde radyoizotopun belirlenmesi sağlanır (Meriç, 1990).

3.2.2 Nötron aktivasyon analizi çeşitleri

Nötron aktivasyon analizini başlıca üç şekilde sınıflandırmak mümkündür.

- Işınlamada kullanılan nötron enerjisine göre:
 - Termal nötron aktivasyon analizi
 - Epitermal nötron aktivasyon analizi (ENAA)
 - Hızlı nötron aktivasyon analizi (FNAA)
- Gama ışınlarının ölçüm şekline göre:
 - Ani gama (Prompt Gama) aktivasyon analizi (PGNAA)
 - Gecikmiş gama (Delayed Gama) aktivasyon analizi (DGNAA)
- Numuneye uygulanan işleme göre:
 - Enstrümantal nötron aktivasyon analizi (INAA)
 - Radyokimyasal nötron aktivasyon analizi

NAA sınıflandırmaları ışığında, analizlerde yaygın olarak kullanılan yöntem, termal nötronların kullanıldığı, gecikmiş nötronların değerlendirildiği, Enstrümantal Nötron Aktivasyon Analizi (INAA)'dır (Tuğrul, 2013).

3.2.2.1 Enstrümental nötron aktivasyon analizi

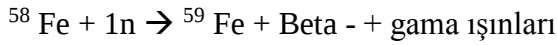
Bu tip NAA'da, numune herhangi bir işleme (kimyasal vb.) tutulmaksızın olduğu şekliyle ışınlamaya hazırlanarak ışınlama yapılmaktadır (Neff, 2003).

Enstrümental nötron aktivasyon analizinin elementlere göre duyarlılığı Şekil 3.1'de ayrıntılı olarak verilmiştir. "n-gama" reaksiyonuna göre bu tekniğin elementler açısından duyarlılığı belirtilmiştir.

Enstrümental nötron aktivasyon analizi deneysel ilkeleri

"Nötron-gama reaksiyonu", nötron aktivasyon analizi için deneysel bir reaksiyondur.

Örneğin;



^{58}Fe : Kararlı demir izotopu

^{59}Fe : Radyoaktif demir izotopu

^{59}Fe 'nin bozunması esnasında yayımlanan gama ışınlarının enerjisi 142.4, 1099.2 ve 1291.6 keV'dir ve bu gama ışınları bu radyonüklid için karakteristiktir. Nötronun bir çekirdekle etkileşme olasılığı, nötronun enerjisinin bir fonksiyonudur. Bu etkileşme "tesir kesiti" olarak adlandırılır ve her bir nüklidin kendisine has bir enerji-tesir kesiti ilişkisi vardır (Neff, 2003).

Belli bir radyonüklid için, bir t süre ışınlaması boyunca, aktivite, Dk. 3.1 ile verilir.

$$A(t) = \sigma_{\text{act}} \Phi_f N(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.1)$$

$A(t)$: Birim zaman başına bozunma aktivitesi,

σ_{act} : Aktivasyon tesir kesiti,

Φ_f : Nötron akısı ($\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$),

N : Başlangıç (ana) atom sayısı,

λ : Bozunma sabiti,

t : Işınlama süresi.

Bu denkleme göre bir radyonüklid için toplam aktivite, aktivasyon tesir kesiti, nötron akısı, ana atom sayısı ve ışınlama zamanının bir fonksiyonudur.

Herhangi bir radyonüklid için, radyoaktif bozunma, ışınlama ile oluşur. Dolayısıyla toplam aktivite, üretim (production) oranı ile bozunma (decay) oranı arasındaki fark olarak tanımlanır. Eğer ışınlama süresi, radyonüklidin yarılanma süresinden çok fazla ise, doyuma ulaşılır.

$$t_{1/2} = 0.693/\lambda \quad (3.2)$$

$t_{1/2}$: Yarılanma ömrü.

λ : Bozunma sabiti.

Optimum ışınlama süresi, numunenin ve kullanılan elementlerin çeşidine göre farklılık gösterebilir. Nötron akısı sabit olmadığından, her bir numuneden kaynaklı toplam akı iç veya dış bir akım monitörü kullanılarak belirlenebilir (Neff, 2003).

3.2.3 Nötron aktivasyon analizi prosedürleri

3.2.3.1 Numune hazırlama

Çoğu elementin dedeksiyon limitinin düşük olmasından dolayı, numune alma ve numune hazırlama çok kritik bir işlemdir. Kirlenmeye sebebiyet verilmemesine dikkat edilmelidir. Gerekli prosedürler uygulandığında sıvı ve gaz matrisleri için de kullanılan bir teknik olmasına karşın, numunelerde tercih edilen, matrisin katı fazda olmasıdır (Şekil 3.2). XRF tekniği ile pratik olarak her katı malzeme analiz edilmesine karşın, NAA'de numunenin ışınlama tüpüne yerleşim düzeni gibi bazı geometrik prosedürler vardır. Bu bağlamda analiz edilecek elementler seçilirken geometrik faktörler göz önünde tutulmalıdır (Url-3).



Şekil 3.2 : Numune örnekleri (Url-3).

Öğütme, tartma, paketlenme, etiketleme, ışınlama tüpüne yerleştirme işlemleri sırasıyla yapılarak numune ışınlamaya hazır hale getirilir (Url-3).

3.2.3.2 Işınlama

Nükleer reaktörlerde termal, epitermal ve hızlı nötronlarla bombardıman işlemi gerçekleştirilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Bir nükleer reaktöre ait resimler (Url-4).

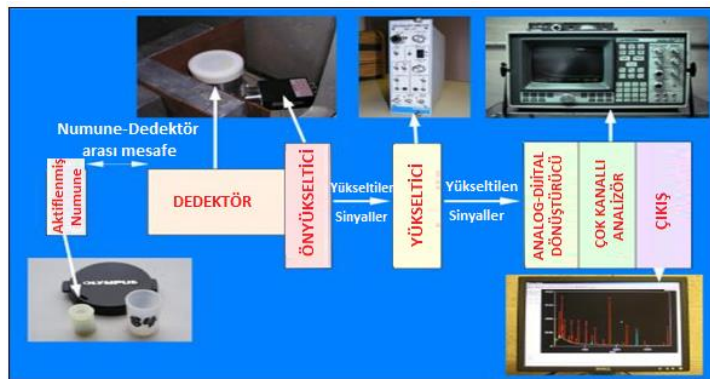
Doğal izotoplar ve izotopik bolluk

Bir nötron akısıyla ışınlanıp aktifleştirilen bir elementteki atom sayısı, numunenin başlangıçtaki atom sayısına bağlıdır. Bununla birlikte, atom numarası belli bir element nötronlarının sayısı ile ilişkilendirilebilir ve elementlerin farklı doğal izotopları nötronlarla etkileşimlerinden farklı şekilde etkilenebilirler. Birkaç doğal izotop hariç, doğal izotopların neredeyse hiçbiri, nötron aktivasyon analizinde kullanılabilecek radyoaktif bir izotop üretemezler (Neff, 2003).

3.2.3.3 Ölçme

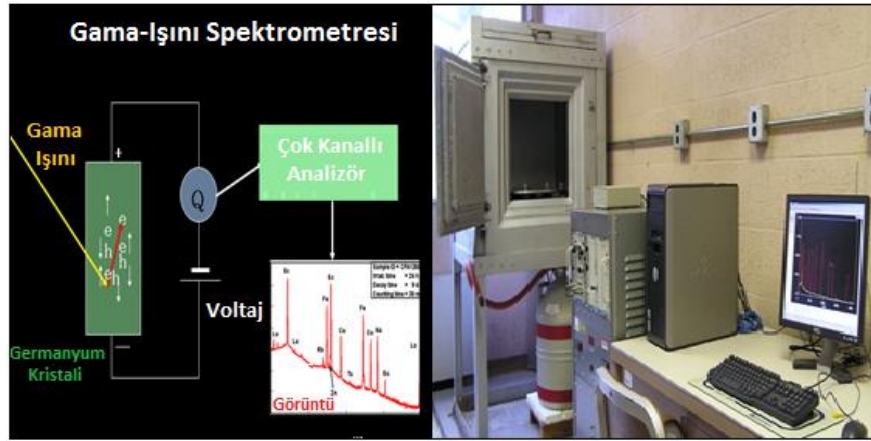
Gama spektrometresi

Bir gama spektrometre sistemi, dedektör (dedektörü besleyen yüksek voltaj kaynağı ile birlikte), ön yükseltici, yükseltici, analog-dijital dönüştürücü, çok kanallı analizör ve çıkış cihazı bileşenlerini içerir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : Gama spektrometre sistemi akış diyagramı (Url-3).

Dedektörler, termal gürültünün minimize edilmesi için krojenik sıcaklık (sıvı azot sıcaklığı 77K)'de tutulmalıdır. Dedektörlere gelen ilk sinyaller çok zayıf olduğundan, dedektöre doğrudan bağlı olan önyükseltici; bu sinyalleri yükseltir. Yükseltilecek sinyaller (spektroskopi) yükselticisi aracılığıyla biçimlendirilir ve analog-dijital dönüştürücü aracılığıyla dijital sinyale dönüştürülür. Dijital sinyaller çok kanallı analizörde dijital formda saklanırlar. Modern gama spektroskopi sistemlerinde, yüksek voltaj güç kaynağı, spektroskopi yükselticisi, analog-dijital dönüştürücü ve çok kanallı analizör tek bir modül halindedir (Şekil 3.5) (Url-3).



Şekil 3.5 : Gama ışını spektrometresi ve modern gama spektrometre cihazı (Url-3).

Spektrumun görüntülenmesi ve spektruma ait yapılacak hesaplamalar bir bilgisayar aracılığıyla yapılmaktadır. Çeşitli yazılımlar ve algoritmalar kullanılarak; bir spektrumdaki her bir gama pikinin enerjisi ve biçimi belirlenir ve yine bu algoritmalar aracılığıyla, piklerde içiçe girmiş alanlar belirlenir. Ardarda bozunma, etkileşimler, akım, fisyon üretim düzeltmeleri ve bir standart ile karşılaştırma yapılarak kantitatif bir analiz elde edilebilir (Url-3).

3.2.4 Nötron aktivasyon analizinin avantaj ve dezavantajları

3.2.4.1 Avantajları

- Aynı anda birçok element analizi.
- Kimyasal işlemler uygulanmadan analiz yapılabilmesi.
- Tahribatsız muayene bağlamında uygulanabilmesi.
- Kalitatif ve kantitatif analiz yapılabilmesi.
- Yüksek hassasiyet, yüksek tahmin sağlayabilmesi.

- Farklı formlarda (katı, sıvı, gaz) analiz imkanı.
- Çok az miktarda numune ile gerçekleştirilebilmesi (0.1mL veya 0.001mg).
- Diğer tekniklere kıyasla nisbeten ucuz olması.
- Milyarda-bir (ppb) seviyesinde ölçüm yapabilmesi (Neff, 2003).

3.2.4.2 Dezavantajları

- Her laboratuarda gerçekleştirilebilecek bir yöntem değildir.
- Bir reaktöre ve reaktör yakınında gerekli donanımına sahip bir laboratuara gereksinim vardır.
- Analizler için zaman gereksinimi vardır.
- Numunenin analizi, aktivasyon sonucunda oluşacak radyonüklitlerin yarı ömürlerine bağlı olarak birkaç saat ile birkaç gün arasında değişebilir.
- B, C, O vb. gibi hafif elementler INAA ile analiz edilemez.
- Nükleer güvenlik bakımından dikkat edilmesi gerekir (Neff, 2003).

3.2.5 Nötron aktivasyon analizinin kullanım alanları

Çeşitli kısıtlamaları olmasına karşın özellikle INAA farklı disiplinlerde ve disiplinlerarası çalışmalarda yaygın olarak kullanılmakta ve bu tekniklerle yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır.

Başlıca kullanım alanları:

- Kayaç, mineral ve toprak analizleri.
- Atmosferik hava ölçümleri.
- Arkeolejik eser analizleri.
- Ağaç halkalarının değerlendirilmesi.
- Saç, tırnak ve deri analizleri.
- Adli tıp çalışmalarında.
- Bitki, hayvan malzeme analizleri.
- Kömür analizleri.
- Endüstriyel ve gıda analizleri şeklinde sıralanabilir (Url-3).

3.3 X-ışını Floresans Tekniği

3.3.1 X-ışını floresans tekniğine giriş

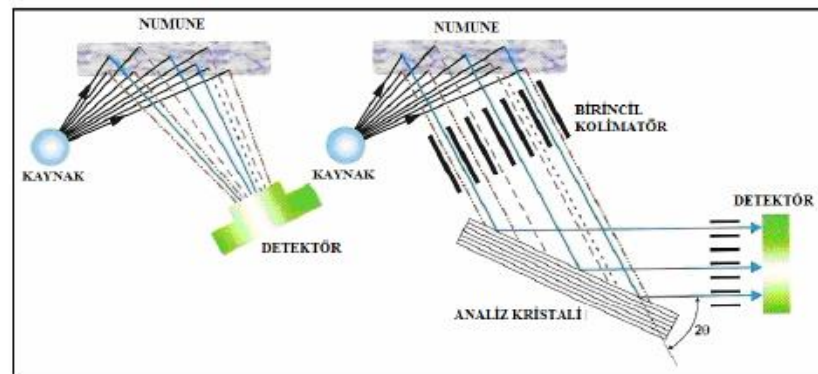
X-ışını floresans tekniği (XRF), genel olarak foton madde etkileşmesi sonucu meydana gelen karakteristik X-ışınları ve saçılma fotonlarının nicel ve nitel değerlendirilmesine bağlı olarak uygulanan bir tekniktir. Katı, sıvı, toz hatta gaz durumlarında bile uygulanabilmektedir. XRF tekniği ile hızlı, duyarlı ve güvenilir bir şekilde malzemeye zarar vermeden düşük maliyetle kısa sürede ölçüm yapılmaktadır. Bu nedenle bilimsel ve teknolojik araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).

XRF tekniği, karakteristik pik şiddetlerinin ölçülebilmesini ve numuneden gelen çok enerjili ışın demetini ayırmayı sağlar. Bir spektrometrenin, çizgileri ayırabilmesi için yeterli rezolüsyona sahip olması gerekir. Aynı zamanda spektrometre, ilgili dalga boyu ve enerji bölgesinde ölçüm yapabilme imkânı sağlamaktadır. Bu nedenle, spektrometre seçerken dört önemli faktör vardır (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).

1. Rezolüsyon.
2. Karakteristik pik.
3. Temel sayma seviyesi.
4. Enerji veya dalga boyu aralığı.

3.3.2 X-ışını floresans tekniği çeşitleri

X-ışını floresans spektrometresi çalışma prensibine göre; dalgaboyu dağılımlı X-ışını floresans spektrometresi (WDXRF) ve enerji dağılımlı X-ışını floresans spektrometresi (EDXRF) olmak üzere iki kısımda incelenmektedir.



Şekil 3.6 : EDXRF ve WDXRF spektrometrelerinin temel planları (Koç, 2009).

Bütün spektrometreler bir kaynak, numune ve sayım sisteminden oluşur. Kaynaktan bir numuneye ışın gönderilir ve numuneden gelen karakteristik X-ışını bir detektörle ölçülür. Çoğu durumda, kaynak olarak bir X-ışını tüpü, radyoizotop kaynak veya hızlandırıcı kullanılır. Enerji dağılımlı sistemler (EDXRF) ile dalga boyu dağılımlı sistemler (WDXRF) arasındaki farklılık dedeksiyon sistemindedir (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).

3.3.2.1 Dalgaboyu dağılımlı X-ışını floresans spektrometresi

Bir WDXRF spektrometre sistemi, X-ışını tüpü, numune tutucu, kolimatör, kristal, filtre ve detektörden oluşur. Dalga boyu dağılımlı XRF spektrometrelerinde, örnekten yayınlanan floresans X-ışınları, bir kristal üzerine düşürülür ve bu kristal yardımıyla X-ışınları farklı dalga boylarında; farklı doğrultularda kırınımına uğratılır. Uygun bir açıyla bir detektörün yerleştirilmesiyle X-ışınlarının şiddeti belli dalga boylarında ölçülür (Brouwer, 2009).



Şekil 3.7 : Dalga boyu dağılımlı X-ışını (WDXRF) cihazı (Url-8).

Bragg yasası

Dalgaboyu dağılımlı X-ışını floresans spektrometrelerinde, örnekten yayınlanan floresans X-ışınları bir kristal üzerine düşürülür ve Bragg yasasıyla dalgaboyu ölçülür (Şekil 3.8) (Brouwer, 2009).

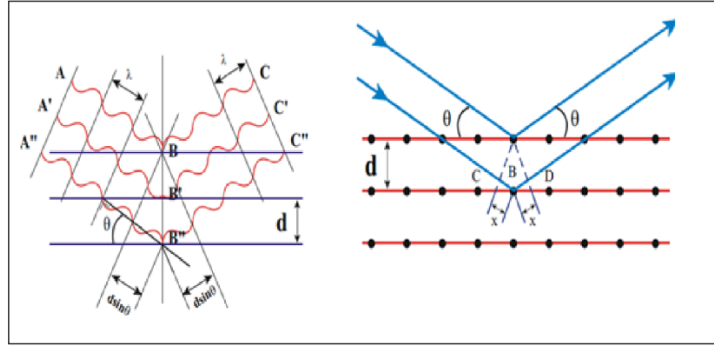
$$\lambda = d\sin\Theta + d\sin\Theta = 2d\sin\Theta \quad (3.3)$$

Θ : Gelen ışının kristal yüzeyi ile yaptığı açı.

n : Tamsayı.

λ : Dalga boyu.

d : Kristal düzlemleri arası uzaklık.

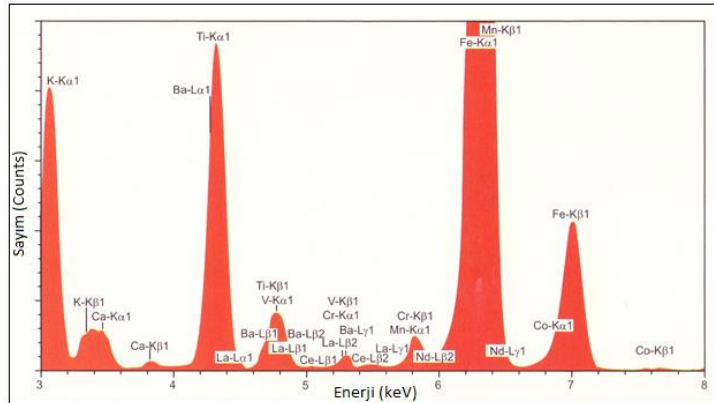


Şekil 3.8 : Bragg yasası (Url-7).

WDXRF spektrometresi ile istenen elementlerin saptanmasında, tüm açılar taranır ve bu işlem farklı tipte birkaç kristal kullanarak yapılır. Bu şekilde sodyumdan uranyuma kadar tüm elementler saptanabilir. Bu zaman alıcı bir işlemdir, yarım saat ile birkaç saat arasında sürmektedir. Toplam geçen zamanın uzun olmasına karşın, her bir elemente düşen zaman çok azdır (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).

3.3.2.2 Enerji dağılımlı X-ışını floresans spektrometresi

Enerji dağılımlı X-ışını floresans spektrometresi (EDXRF) hızlı, tahrip edici olmayan, ucuz ve hassas çoklu element analizi özelliklerine sahip çıkması nedenlerinden dolayı arkeolojik malzemelerin kantitatif ve kalitatif analizi için uygun bir tekniktir. Bu yöntemde X-ışınlarının enerjisi doğrudan doğruya ölçülür. Oluşturdukları spektrum enerji başına sayma sayısıdır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 : Tipik enerji dağılımlı X-ışını (EDXRF) spektrumu (Brouwer, 2009).

Enerji dağılımlı X-ışını floresans spektrometresinin analiz aralığı çok geniştir. Atom numarası 11 ile 92 arası olan elementlerle çalışılabilir. Bu tekniğin elementlere göre duyarlılığı şekil 3.10'da verilmiştir.

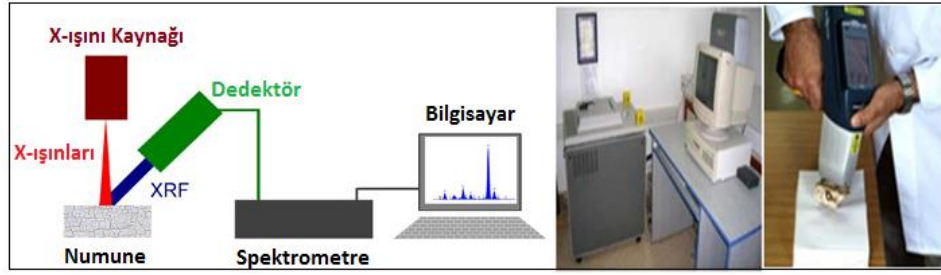
H Hydrogen 1																	He Helium 2													
Li Lithium 3	Be Beryllium 4															B Boron 5	C Carbon 6	N Nitrogen 7	O Oxygen 8	F Fluorine 9	Ne Neon 10									
Na Sodium 11	Mg Magnesium 12															Al Aluminum 13	Si Silicon 14	P Phosphorus 15	S Sulfur 16	Cl Chlorine 17	Ar Argon 18									
K Potassium 19	Ca Calcium 20	Sc Scandium 21	Ti Titanium 22	V Vanadium 23	Cr Chromium 24	Mn Manganese 25	Fe Iron 26	Co Cobalt 27	Ni Nickel 28	Cu Copper 29	Zn Zinc 30	Ga Gallium 31	Ge Germanium 32	As Arsenic 33	Se Selenium 34	Br Bromine 35	Kr Krypton 36													
Rb Rubidium 37	Sr Strontium 38	Y Yttrium 39	Zr Zirconium 40	Nb Niobium 41	Mo Molybdenum 42	Tc Technetium 43	Ru Ruthenium 44	Rh Rhodium 45	Pd Palladium 46	Ag Silver 47	Cd Cadmium 48	In Indium 49	Sn Tin 50	Sb Antimony 51	Te Tellurium 52	I Iodine 53	Xe Xenon 54													
Cs Cesium 55	Ba Barium 56															Hf Hafnium 72	Ta Tantalum 73	W Tungsten 74	Re Rhenium 75	Os Osmium 76	Ir Iridium 77	Pt Platinum 78	Au Gold 79	Hg Mercury 80	Tl Thallium 81	Pb Lead 82	Bi Bismuth 83	Po Polonium 84	At Astatine 85	Rn Radon 86
Fr Francium 87	Ra Radium 88																													
		La Lanthanum 57	Ce Cerium 58	Pr Praseodymium 59	Nd Neodymium 60	Pm Promethium 61	Sm Samarium 62	Eu Europium 63	Gd Gadolinium 64	Tb Terbium 65	Dy Dysprosium 66	Ho Holmium 67	Er Erbium 68	Tm Thulium 69	Yb Ytterbium 70	Lu Lutetium 71														
		Ac Actinium 89	Th Thorium 90	Pa Protactinium 91	U Uranium 92	Np Neptunium 93	Pu Plutonium 94	Am Americium 95	Cm Curium 96	Bk Berkelium 97	Cf Californium 98	Es Einsteinium 99	Fm Fermium 100	Md Mendelevium 101	No Nobelium 102	Lr Lawrencium 103														

Özel koşullara sahip XRF ile analiz edilen elementler

XRF ile analiz edilemeyen elementler

Şekil 3.10 : XRF tekniği ile analiz edilebilen elementler (Url-8).

Enerji dağılımlı spektrometre sisteminde, örnekte mevcut olan her bir değişik elementten gelen saymalar, aynı anda saptanır. Sayma sayıları çok azdır. Eser miktardaki elementler için en çok 10 dakika sarf edilir. EDXRF spektrometrelerinin dedeksiyon sistemi, numuneden gelen karakteristik X-ışınlarını enerjilerine göre kanallara yerleştirir (Şekil 3.11). Bu ayrılma işlemi, dispersiyon olarak ifade edilir. EDXRF kısa dalga boylu X-ışını yayınlan elementlerinin analizinde üstünlük taşımaktadır (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).



Şekil 3.11 : Enerji dağılımlı XRF tekniği prensibi ve modern sistemi.

3.3.3 X-ışını floresans tekniği için numune hazırlanması

X-ışını floresans tekniğinde katı, sıvı, toz hatta gaz halindeki numunelerle çalışılabilir (Şekil 3.12). Spektroskopik metotlar içinde en kolay ve en yaygın uygulanan metotlardan olan, tablet haline getirilen toz numuneler tercih edilmektedir. Toz numuneler spektrometrede, numune kaplarına konarak, ince tabaka halinde mylar film üzerine yayılarak ya da basınç ile pelet haline getirilerek analiz edilebilir. Partikül büyüklüğü toz numuneler için önemlidir. Toz numunenin homojen olmaması, partikül büyüklüğünün, yoğunluğunun, şekil ve yapısının farklı olması gibi durumda toz numune ile çalışmak zordur. Bir analizde, analit çizgi şiddetini daima etkileyen ortalama partikül büyüklüğü ve partikül dağılımı, numune ve standart için aynı olmalı ve ölçümlerde farklılıktan kaçınılmalıdır (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).



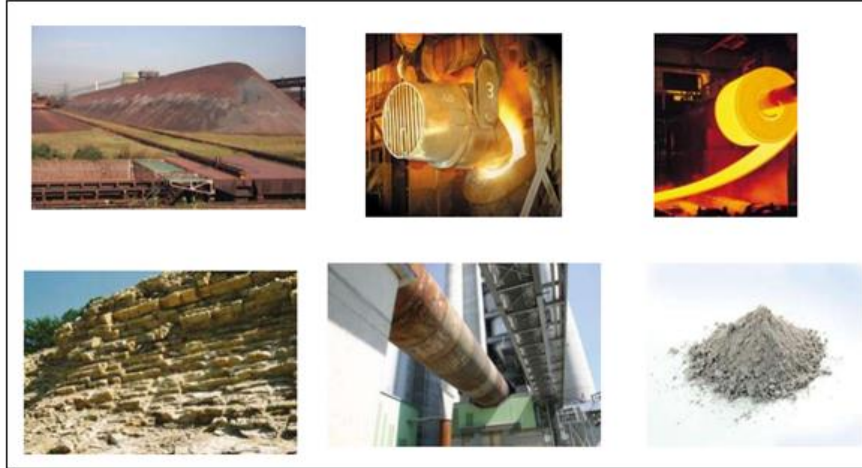
Şekil 3.12 : X-ışını floresans tekniği numune biçimleri (Ender, 2006).

Floresans şiddeti, partikül büyüklüğü ile ilgili olduğundan, numunenin çok iyi öğütülüp homojen hale getirilmesi gerekir. Ayrıca partikül büyüklüğü ve matris etkilerinin elimine edilmesi için, numune ve standardın aynı partikül büyüklüğüne ve matrise sahip olmaları gerekir. Bunun için tabletleme basıncının belli bir değerde olması, partikül büyüklüğü etkilerini ortadan kaldırmada önemlidir (Bertin, 1984; Willard ve diğ, 1981).

3.3.4 X-ışını floresans tekniğinin kullanım alanları

XRF tekniğinin uygulama alanları şu şekilde sıralanabilir:

- Temel fizik araştırmaları.
- Metalürjide, alaşım analizleri.
- Maden filizlerinin analizleri.
- Radyoaktif cevher analizleri.
- Endüstride, plastik, lastik, kağıt ve cam gibi maddelerde safsızlık analizleri.
- Petrol ürünleri, boya ve ince film analizleri.
- Kömürlerde kül, kükürt ve nem tayinleri.
- Çeşitli bitki.
- İnce metal ve film kaplama kalınlıklarının tayinleri (Şekil 3.13) (Url-5).



Şekil 3.13 : X-ışını floresans tekniğinin kullanım alanları.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Arkeolojik Numuneler

4.1.1 Kazı bölgesine ait bilgiler

Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma Bakanlığı ile İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından hazırlanan ve Türkiye'nin en büyük raylı toplu ulaşım ağını oluşturan Marmaray ve Metro projeleri kapsamında Üsküdar, Sirkeci ve Yenikapı'daki istasyonların inşası sırasında açığa çıkan arkeolojik etütlük 33 adet seramik buluntu, Kültür ve Turizm Bakanlığı, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü'nün izniyle, İstanbul Arkeoloji Müzeleri Müdürlüğü başkanlığından mühürlü ve listelenmiş olarak alınmış ve incelenmiştir.

Kazı alanına ait resimler Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te; bu bölgeye ait İstanbul Arkeoloji Müzesi tarafından hazırlanan vaziyet planı ise Şekil 4.4'te verilmektedir.



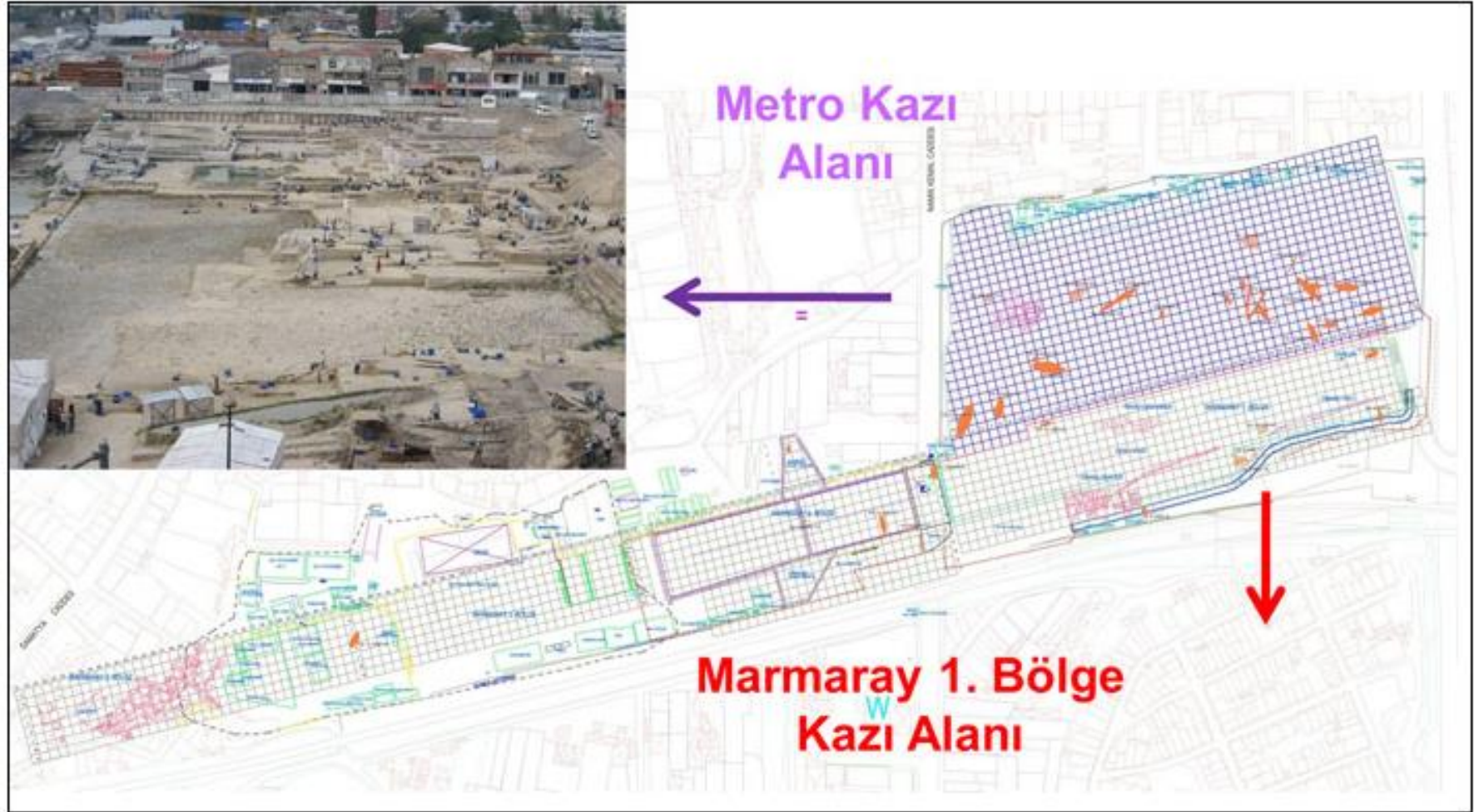
Şekil 4.1 : Yenikapı kazı bölgesine ait uydu harita (Url-9).



Şekil 4.2 : Yenikapı kazı alanı çalışmalarından bir görüntü (Url-9).



Şekil 4.3 : Yenikapı kazılarında ele geçen Yenikapı-35 adlı batık gemi (Url-9).



Şekil 4.4 : Yenikapı kazıları vaziyet planı.

İstanbul tarihinin en kapsamlı arkeolojik kazılarına dönüşen bu çalışmalar sırasında, merkezi bir istasyonun kurulduğu Yenikapı'da -1 metre ile -6.30 metre arasında Erken Bizans Dönemi'nin en büyük limanı olan Theodosius Limanı gün ışığına çıkarılmıştır (Şekil 4.5) (Url-9).



Şekil 4.5 : Tarihte Theodosius Limanı ve haritası (Url-9).

4.1.2 Arkeolojik numunelerin toplanması ve sınıflandırılması

Arkeolojik etütlük buluntular, İstanbul Arkeoloji Müzesi Müdürlüğü'nden alınan resmi izinle mühürlü şekilde teslim alınmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : Arkeolojik etütlük buluntuların teslim alındığındaki durumu.

Kazı bölgesinden toplanan etütlük buluntulara, açma bölgeleri ve kodları baz alınarak isimlendirme yapılmıştır. Şekil 4.4'te gösterilen Yenikapı kazı alanına ait bilgiler ve bu yerleşim merkezlerinde yapılan kazı sonucu ele geçen ve arkeologlar tarafından Erken Bizans dönemi olarak tarihlenen, etütlük seramik buluntularına ait bilgiler aşağıdaki resim ve çizelgelerde ayrıntılı olarak verilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 : Seramik örneklerine ait temel veriler.

Sıra No	Eser Adı	Derinlik (m)	Arkeolojik Grup
Seramik 1	Amphora Gövde	-4.25	OJd2
Seramik 2	Amphora Gövde	-4.11/-5.23	1D1
Seramik 4	Amphora Gövde	-4.11/-5.28	1C-4
Seramik 5	Tabak Ağız	-4.25	OJd2
Seramik 7	Piştirme Kabı Gövde	+0.09/-0.09	5Ga3
Seramik 8	Amphora Gövde .	+0.09/-0.09	5Ga3
Seramik 10	Amphora Gövde	-3.59/-3.65	1Ib1
Seramik 12	Amphora Gövde	-1.70/-1.80	4Gb3
Seramik 13	Piştirme Kabı Gövde	-1.70/-1.80	4Gb3
Seramik 14	Kiremit Parçası	-2.11/-2.27	4Gd2
Seramik 16	Amphora Gövde	-1.95	4A3a3
Seramik 17	Amphora Gövde	-3.95/-4.00	4A3a3
Seramik 18	Amphora Gövde	-3.95/-4.00	OJd2
Seramik 19	Amphora Gövde	-3.74/-3.87	1Ia2
Seramik 20	Amphora Gövde	-3.18/-3.34	1Id3
Seramik 21	Amphora Gövde	-3.73/-3.90	4Gb2
Seramik 23	Amphora Gövde	-5.25/-5.40	Ojd3
Seramik 24	Amphora Gövde	-4.25	OJd2
Seramik 25	Amphora Gövde	+0.30/+0.19	6Ic2
Seramik 27	Tuğla Parçası	+0.30/+0.19	6Ic2
Seramik 28	Amphora Gövde	-4.06/-4.22	3Hc4
Seramik 29	Amphora Gövde	-0.33/-0.51	5Id1-d2
Seramik 30	Amphora Gövde	+0.94/+0.79	5Hd4
Seramik 31	Amphora Gövde	+3.20/+3.02	7Hd4
Seramik 32	Seramik Tabak Ağızı	+3.20/+3.02	7Hd4
Seramik 33	Amphora Gövde	+4.22/+4.06	7Hc4
Seramik 34	Sırlı Testi Göve	+4.22/+4.06	7Hc4
Seramik 35	Amphora Gövde	+0.71/+0.54	6Ib1
Seramik 38	Sırlı Kase Ağız	+0.34/+0.12	5Ic3
Seramik 40	Amphora Gövde	+1.14/+1.00	6Id1
Seramik 42	Pithos Gövde	-1.32/-1.49	6Hb1
Seramik 43	Kap Gövde	+3.54/+3.20	7Hd4
Seramik 44	Sırlı Kase Gövde	+3.54/+3.20	7Hd4

İstanbul Arkeoloji Müzesi'nden teslim alınan numunelerin İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Malzeme Üretim ve Hazırlama Laboratuvarı'nda resimleri çekilmiş ve bu numunelere ait resimler Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7 : Seramik numunelerin resimleri.

4.2 Seramik Buluntularının Analize Hazırlanması

Seramik buluntular, analiz edilmeden önce yapılan işlemler aşağıda sırasıyla belirtilmektedir.

4.2.1 Öğütme

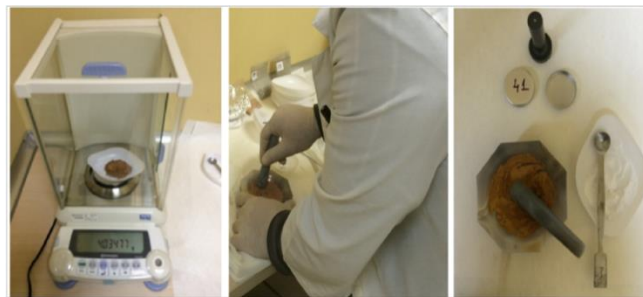
Seramik buluntular, NAA ve EDXRF analizlerine gönderilmeden önce tungsten karbür bilyalı öğütücüde öğütülmüştür. Tungsten karbür bilyalı öğütücüde, her bir numune 5 dakika süre ile öğütülerek analize uygun hale getirilmiştir. İşlemler sırasında kimyasal bir kirliliğin oluşmaması için, numuneler öğütülürken kullanılan ekipmanların temizlenmesi, öğütülen numunelerin koruyucu poşetler halinde paketlenmesi gibi kimyasal kurallar dikkate alınmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 : Bilyalı öğütücü ve öğütülen seramik numunelerinin biçimi.

4.2.2 Hassas terazide tartım ve karıştırma

Hassas terazi kullanılarak bilyalı öğütücüden elde edilen her bir seramiğe ait toz numuneler 4'er mg'lık olacak şekilde tartılmıştır. Ayrıca, tartma safhasında 1'er mg'lık borik asit, peletleme işlemini kolaylaştırması için her bir numuneye eklenmiştir. Elemental analiz için örneklerin homojenizasyonu, agat havanda gerçekleştirilmiştir. Analizlerin sağlıklı olması, peletlerin yüzeyinin pürüzsüz olması açısından; agat havanda karıştırma işlemi önem arz etmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 : Hassas terazi tartımları ve agat havanda karıştırma işlemi ve elemanları.

4.2.3 Peletleme

Agat havanda homojenize edilen örnekler, XRF analizi için Fushion marka pres ile 40 MPa basınç altında alüminyum kalıplarda sıkıştırılmış ve analiz edilmeye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.10).

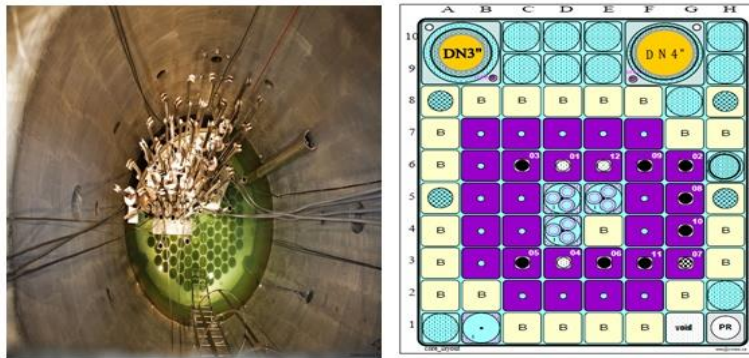


Şekil 4.10 : Peletleme cihazı ve peletlenmiş numunelerden bazıları.

4.3 Seramik Buluntuların Analiz Edilmesi

4.3.1 Nötron aktivasyon analizi deney sistemi ve özellikleri

Nötron aktivasyon analizi deneyleri, Çek Cumhuriyeti Nükleer Araştırma Enstitüsü (REZ) ile gerçekleştirilen ortak CANAM Projesi kapsamında, Çek Cumhuriyeti'nde bulunan Centrum Výzkumu (RCR) araştırma reaktöründe yapılmıştır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 : Deneylerin yapıldığı RCR reaktörü ve bu reaktör kalbinin diyagramı

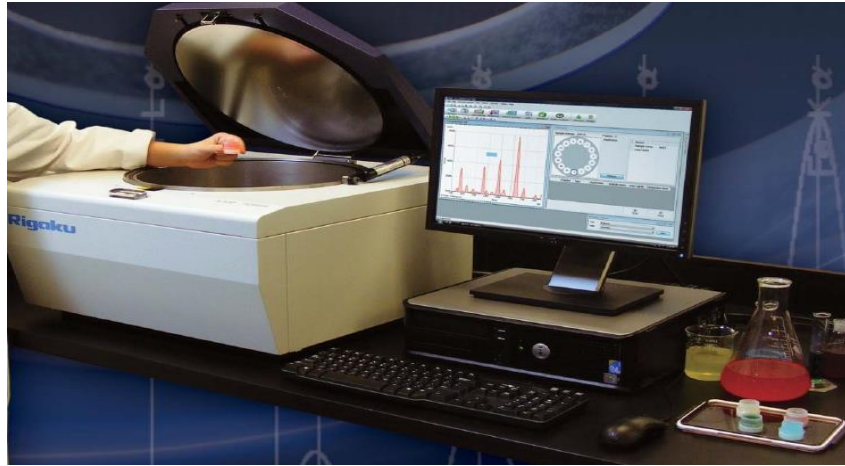
Hazırlanan seramik örneklerine, sertifikalı referans materyaller ve Au monitörlerle birlikte, reaktörde 250 MW güç seviyesinde 1 dk kısa ve 180 dk uzun ışınlama yapılmıştır. Uzun ışınlanan örneklerdeki kısa yarıömürlü radyonüklitlerin sayılabilmesi için 4 gün soğumaya bırakılmıştır. Soğuma süresinin sonunda örnekler, gama spektroskopisinde sayılmaya başlanmıştır. Reaktöre ait veriler, (ışınlama, sayım süresi, akı vb.) aşağıda Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 : Nötron aktivasyon analizinin yapıldığı reaktöre ait bazı veriler.

Reaktör gücü	250 MW
Kısa zamanlı sayım reaktör gücü	10 MW
Uzun zamanlı sayım reaktör gücü	9.4 MW
Kısa zamanlı sayım süresi (t_k)	15 dk
Uzun zamanlı sayım süresi (t_u)	180 dk
Nötron Akısı (Φf)	2.82732×10^{16} nötron $m^{-2}.s^{-1}$
Kullanılan Dedektörler	Ortec, Canberra
Kullanılan Yazılım	Kayzero for Windows V3
Seramiklerin Bulunduğu Kanal	H8 p3

4.3.2 X-ışını floresans analizi deney sistemi ve özellikleri

Renkli bezeme içeren 3 adet seramik buluntu ve diğer seramiklerin XRF analizleri, Maylab AŞ. Madeni Yağ Laboratuvarında Rigaku marka NEXCG Model, kartezyen geometri polarize enerji dağılımlı, Pd anotlu, X-ışını tüplü, X-ışını floresans spektrometresinde yapılmıştır. Güvenilirlik aralığı $\pm 3\sigma$ olacak şekilde 10 dk'lık sayımlar gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : Analiz için kullanılan enerji dağılımlı XRF cihazına ait resim.

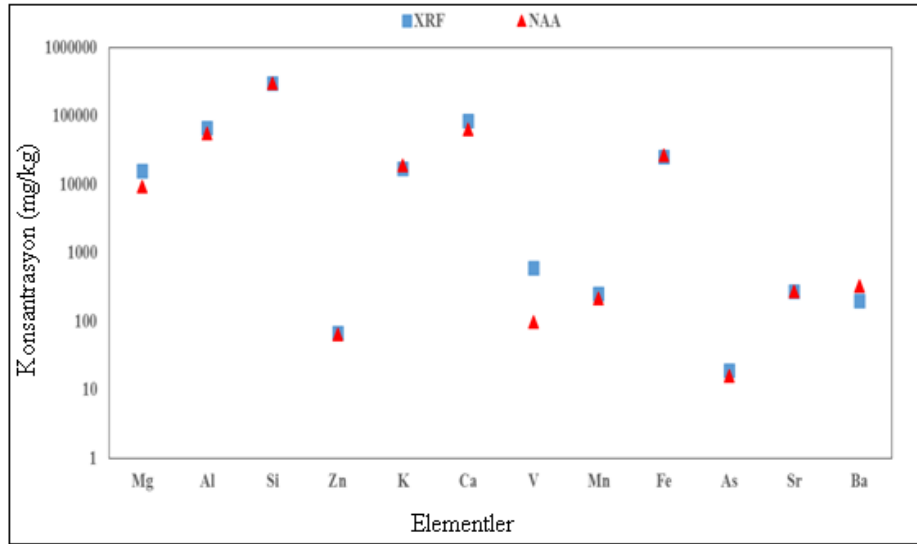
4.3.3 İstatistiksel analizler

Yenikapı kazılarında ele geçen seramiklere ait kantitatif sonuçlar vaziyet planında ilk bulunduğu noktalarla karşılaştırılmak üzere istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Minitab 17.0 istatistik programından yararlanılarak hiyerarşik kümeleme analizi (HCA) uygulanmıştır. Bu sayede dendrogram grafikleri ve kümeleme planı (agglomeration schedule) elde edilerek istatistik sonuçlar yorumlanmıştır. İstatistiksel analiz için kullanılan yöntem ile örnekler benzerlik durumlarına göre değerlendirilmiş, elementel oranlar baz alınarak kümelemeler yapılmış ve seramiklerin birbirleriyle olan ilişkileri incelenmiştir.

5. DENEY SONUÇLARI

5.1 Nötron Aktivasyon Analizi ve XRF Analizi Sonuçları

Seramik buluntuların NAA ve XRF analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Her iki analiz yöntemi ile bulunan sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde, elde edilen verilerin, çoğunlukla birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Her iki yöntemin bazı elementlere karşı duyarlılığı Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : NAA ve XRF analiz sonuçları duyarlılığının birbiri ile kıyaslanması.

Bu nedenle, veriler değerlendirilirken NAA ile saptanamayan elementler, XRF ile elde edilen verilerden yararlanılarak yorumlanmıştır. Yapılan analizlerden herbir element için elde edilen sonuçlar $\mu\text{g/g}$ olarak Çizelge 5.1 'de verilmiştir. Seramikler, kimyasal kompozisyonlarına göre istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve değerlendirme sonuçları Yenikapı kazı çalışmaları için hazırlanan vaziyet planı üzerine yerleştirilerek Şekil 5.6'da ve istatistiksel dendogram olarak Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te verilmiştir.

Tarihi eserlerde kullanılan hammaddelerin ve eserin yapımında uygulanan teknolojinin saptanması, bize o dönemdeki uygarlıkla ilgili bilgi verir. Öte yandan, arkeolojik eserlerin içeriğinin ve eserlerde kullanılan pigmentlerin bilinmesi bu eserlerin sağlıklı olarak onarımı için de elzemdir.

Yapılan analizler sonucu elde edilen elementler $\mu\text{g/g}$ düzeyinde tablolar halinde oluşturulmuştur. Tablolardaki ölçümler (C) ve belirsizlikler (u) toplamı şekilde verilmiştir.

Yenikapı'da açığa çıkarılan ve arkeologlar tarafından Bizans dönemine ait olduğu saptanan antik seramik buluntularının iç astarlarının kimyasal kompozisyonları incelenmiş ve kullanılan malzeme ve pigmentler hakkında bilgi sağlanmıştır.

Erken Bizans dönemi seramik buluntularımızın hemen hepsinin major element içeriklerinin %50-70 SiO_2 , %10-34 Al_2O_3 , %2-6 FeO , %1-5 MgO , %1-5 K_2O , %2-20 CaO olduğu saptanmıştır. Seramiklerin kimyasal kompozisyonunda K, Mg gibi alkaliler içermesi, alkali ihtiva eden kil grubuna girdiklerini göstermektedir.

Seramiklerin hammaddesini oluşturan killer, belirli bir kristal yapıya sahip, doğal, toprağımsı, ince taneli sulu alüminyum silikatlardır. Killer kendi aralarında çok farklılıklar göstermektedirler. Genel olarak, yapılarında K, Na, Ca ve Mg gibi elementleri içerirler. Bazı kil minerallerinde Al yerine kısmen veya tamamen Fe ve Mg yer alır. Su soğurma kapasitesi yüksek olan killer plastiktir. Kildeki montmorillonit yüzdesi, kilin plastisitesini önemli ölçüde değiştirir (Donat, 2003).

Bir kil türü olan illit, temel yapısı montmorillonitinkine benzeyen, silis tetrahedral tabaklarından silis yerine alüminyum geçmesi ile oluşan aradaki tabaka demir ve magnezyumun üçlü tabaka halinde bir paketidir. Birimler, kısaca K atomları ile bağlanmıştır ve kafes yapısı genleşmez. Kimyasal bileşimi; %54,01 SiO_2 , %17,02 Al_2O_3 , %1,85 FeO , %3,11 MgO , %1,13 K_2O ve %12,03 H_2O 'den oluşmaktadır (Ozturk, 2012).

Montmorillonit grubu mineralleri, kaolinite benzemezler ve düzensiz şekilli veya çubuğumsu şekilli partiküller halinde bulunmaya eğilimlidirler. Birimler arasında, suya ilave olarak kalsiyum, sodyum ve potasyumun iyonları olabilir; montmorillonitin herhangi bir kil mineralinden daha çok iyon değişimi gösterdiği bilinir. Kimyasal bileşimi; %43,77 SiO_2 , %18,57 Al_2O_3 , %1,02 CaO , %1,13 Na_2O , %36,09 H_2O 'dur. Erken Bizans dönemine ait seramik buluntularının genel olarak

SiO₂ içeriği %50'nin üzerinde bulunmuştur. CaO içeriğine bakıldığında, 31, 32 ve 33 No.lu örnekler hariç seramik buluntularında kalsiyum içeriği %5'in üzerinde tespit edilmiştir (Ozturk, 2012).

Kaolin, kil mineralleri sınıflandırılması içinde bir grup kil mineraline verilen isimdir. En önemli minerali Kaolinit (Al₂Si₂O₅(OH)₄) olan grubun diğer mineralleri dikit, nakrit ve halloisiddir. Kaolinit alüminyum hidro silikat bileşimli bir kil mineralidir. Kristal yapılarına göre yapılan kil sınıflandırılmasında, eş boyutlu ve bir yönde uzamış olanlar Kaolinit grubu olarak diğerlerinden ayrılmaktadır. Oluşum itibariyle, feldspat içeren granitik veya volkanik kayaçların feldspatlarının değişimi uğrayarak kaolinit mineraline dönüşmesi sonucu kaolinler oluşmaktadır. Ana kayaç içindeki alkali ve toprak alkali iyonların, çözünür tuzlar şeklinde ortamdan uzaklaşması sonucu Al₂O₃ içerikli sulu silikatça zenginleşen kayaç kaoliniti oluşturur. Kimyasal kompozisyonları; %45.54 SiO₂, %39.50 Al₂O₃, %13.96 H₂O'dur (Ozturk, 2012).

Seramik buluntularının genel kompozisyonları incelendiğinde, bu kil minerallerinin kimyasal kompozisyonlarını tam olarak yansıtmamaktadır. Killerin beraberinde kuvars, mika, feldspat, pirit ve diğer bazı mineralleri de içerdiği düşünüldüğünde kimyasal kompozisyonun genel kil yapısından farklılık göstereceği söylenebilir. Yapıdaki kil minerallerinin tam olarak aydınlatılması için XRD ile kristal yapılarının da belirlenmesi yararlı olacaktır.

Analizler sonucu saptanan S içeriği, seramik buluntularında kalker ve alçı taşı mineralinin varlığının bir göstergesidir. 31, 32, 33, 38, 40 ve 42 No.lu seramik örneklerindeki kükürt miktarının, diğer seramik buluntularına göre daha düşük olması bu seramiklerinin hammaddesinin ve kaynağının diğerlerinden farklı olduğunun belirtisidir.

Seramik buluntuların kalsit (CaCO₃) içerikleri değişiktir. 2, 10, 12, 19, 20 ve 24 No.lu seramik buluntularında kalsiyum içeriği oldukça yüksek saptanmıştır. İçerikte kalsitin olması kilin pişirilme sıcaklığı hakkında bir yorum yapılmasına da olanak sağlar. Kalsitin pişirilme sıcaklığı bozulma sıcaklığı olan 720-900°C'den düşük olmalıdır. Bu da, yukarıda belirtilen seramik buluntularının pişirilme sıcaklıklarının düşük olduğunu vurgulamaktadır.

Çizelge 5.1 : NAA ve XRF ile analizlenen elementlerin konsantrasyonları.

(µg/g)	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	V	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Se	Sr	Ba	Pb	Ti	Cr
Seramik 1	19600	71446	263667	1017	71500	486	15200	75714	1006	768	41300	51	77	29	2,14	471	381	12	6800	178
Seramik 2	28646	56098	220733	930	59300	523	15300	144286	721	702	31600	54	67	30	3,56	607	355	19	2770	484
Seramik 4	8262	97378	277200	1048	30400	--	20800	61500	531	875	41600	53	102	12	0,71	270	1066	27	4350	353
Seramik 7	12906	95790	277667	1218	2100	557	23000	66429	531	937	45500	466	95	26	4,98	484	985	679	4320	313
Seramik 10	5277	83618	272533	559	30400	--	14200	104286	630	592	40900	59	69	13	3,56	534	448	20	3290	577
Seramik 11	14775	122781	268333	738	41400	--	24300	13643	741	626	27700	59	48	32	7,12	348	1119	93	2920	226
Seramik 12	8745	88910	252467	1467	2440	446	18700	130714	823	621	42100	183	71	37	0,71	649	876	142	4140	426
Seramik 14	15439	105845	247333	760	1030	258	20800	96429	629	1061	56700	138	124	26	--	460	732	138	5060	311
Seramik 17	15620	67741	300533	742	17700	--	18700	85714	605	253	26800	26	65	16	4,98	271	197	19	3640	182
Seramik 18	15378	95790	299133	1214	15500	--	26100	47571	583	640	42800	56	106	9	2,85	147	358	49	4450	191
Seramik 19	14233	59803	264133	860	41700	--	12200	136429	524	194	29900	43	70	11	4,98	948	166	12	3030	184
Seramik 20	24847	54510	224467	1070	59800	179	11100	137143	755	703	26700	41	57	5	5,69	493	256	7	4860	206
Seramik 21	14414	113784	290733	926	1310	118	31400	41929	741	514	36800	53	87	32	--	186	385	32	5070	236
Seramik 23	16766	80972	249667	734	77600	142	16100	97143	504	695	37400	42	78	51	1,42	304	337	22	3230	308
Seramik 24	39079	56627	223533	961	48000	228	15300	141429	707	821	33100	55	70	91	--	597	124	14	3150	850

Çizelge 5.1 (devam) : NAA ve XRF ile analizlenen elementlerin konsantrasyonları.

(µg/g)	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	V	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Se	Sr	Ba	Pb	Ti	Cr
Seramik 25	12906	103729	295400	1533	1480	113	13500	35561	1081	676	39800	223	100	88	3,56	152	214	99	5480	490
Seramik 27	22917	84147	310333	1083	1100	76	17500	40929	584	498	30700	358	92	22	4,27	234	252	92	3730	209
Seramik 28	24063	106375	272067	1755	14500	--	26000	47786	830	658	35300	79	79	86	--	320	331	26	4430	222
Seramik 29	19178	94202	294467	2249	2240	161	29900	52500	613	407	40100	115	96	90	2,14	331	425	85	3910	343
Seramik 30	36124	91027	288400	1070	573	--	23200	53357	606	771	53300	65	119	15	2,14	183	271	63	4640	314
Seramik 31	3245	113255	334600	528	316	--	10600	2550	748	264	45500	51	74	17	2,14	32	147	29	7000	220
Seramik 32	2641	184171	280467	463	261	--	11800	3386	592	117	24300	91	133	13	2,85	61	210	965	4300	179
Seramik 33	2141	115901	336467	498	271	--	9800	2229	802	217	40100	59	67	10	2,85	31	166	28	7400	251
Seramik 35	30576	94202	286067	1423	1220	96	23200	56286	590	984	50200	84	117	25	1,42	201	318	29	3930	335
Seramik 36	9830	68800	352333	742	887	73	14500	33429	526	600	28400	62	55	12	9,25	216	292	211	4210	303
Seramik 38	1472	125427	331800	790	--	--	9785	23500	755	115	13440	46	--	--	12,81	45	212	9654	--	207
Seramik 40	34677	95790	281400	991	575	351	22300	60786	605	1038	49900	68	108	15	--	193	270	45	4300	309
Seramik 41	13026	86793	286067	1244	2060	148	25900	81429	564	452	31000	129	86	26	4,27	357	417	142	3470	393
Seramik 42	8142	109021	318267	664	462	44	11400	14857	514	2944	29400	74	47	25	5,69	328	224	30	3290	156

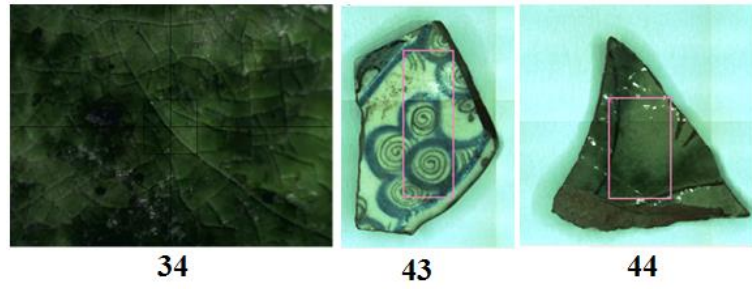
Seramik buluntularda TiO_2 saptanması, seramiklerin pişirilme işleminin düşük sıcaklıklarda yapıldığını işaret etmektedir. Seramik buluntularının hepsinde titanyum saptanmış olması Erken Bizans döneminde seramik teknolojisinin fazla gelişmediğini, seramiğin pişirilme işlemlerinin henüz düşük sıcaklıklarda gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Hematit, Fe_2O_3 formundaki demir mineralidir. Kan taşı olarak da bilinen hematitin en yaygın rengi kırmızı-kahverengidir. Ayrıca siyahtan griye, sarıdan kahverengine kadar içerdiği diğer kayalardan ötürü farklı renkler de bulunur. Hematit, pigment olarak da kullanılmaktadır. Tarih öncesi çağlarda ilk kullanımı 164.000 yıl öncelerine dayanmaktadır. Toz şeklindeki mineral, Güney Afrika'da bulunan Pinnacle Point mağarasında sosyal farklılaşma için kullanılmıştır. Hematit artıkları, takriben MÖ 80000 yılına ait mezarlarda bulunmaktadır. Polonya'da bulunan Rydno ve Macaristan'daki Lovas yakınlarında paleolitik hematit çukurları bilinmektedir (MÖ 60000) (Url-11). Seramik buluntularında hematitin bulunması, ürünlerin oksitleyici atmosferde pişirildiklerinin bir kanıtıdır. Erken Bizans seramik buluntularında Fe_2O_3 içeriği %2 ile %6 arasında değişmektedir .

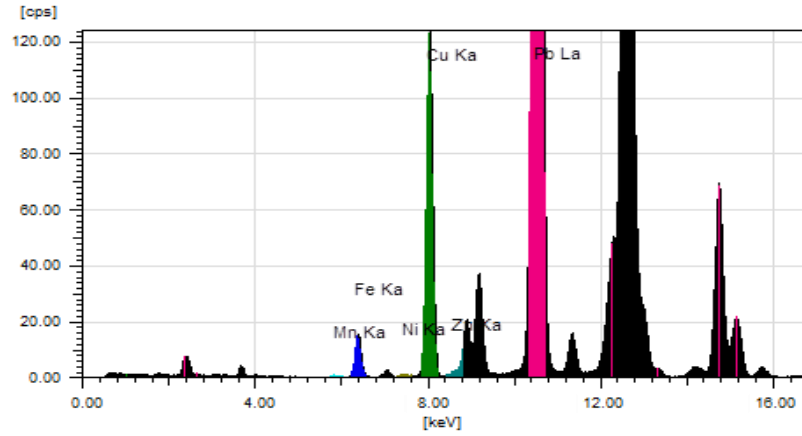
Kalkerlerin oluşumu dikkate alındığında, litoral ortamda veya evaporasyon olduğu durumda mutlak surette tuz bulunur veya sonradan suların etkisi ve infiltrasyon ile bünyesine girmiş halde klorür, florür, ve bromürler bulunabilceği bilinmektedir. Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi bazı seramik buluntularının kimyasal içeriğinde klorüre rastlanmıştır. Bu sonuç, bu seramiklerinin yapısında kalker olduğunun bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

Yine aynı şekilde, magnezyum bileşikleri, kalkerin oluşumu ve oluşumundan sonraki başkalaşmanın etkisi ile dolomit ($CaMgCO_3$) ve manyezit ($MgCO_3$)'in seramiğin yapısında bulunmasından ileri gelmektedir. Seramik buluntularında saptanan MgO içeriği %1 ile %6 arasında değişmektedir. Bu sonuçta, seramiklerin yapısında değişen oranlarda kalker olduğunu göstermektedir.

Renkli bezemelere sahip 3 adet seramik buluntunun ana astar ve bezeme kısımlarının analizi EDXRF ile yapılmıştır. Analizlenen örneklerin EDXRF görüntüleri Şekil 5.2, ve Şekil 5.3; elemental içerikleri ise Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 5.2 : Bezemeli seramiklerin orjinal görüntüleri.



Şekil 5.3 : 34 nolu bezemeli seramik için major element bantları.

Çizelge 5.2 : 34 No.lu bezemeli seramiğin bezeme ve iç astarının kimyasal kompozisyonu.

Element	Konsantrasyon (µg/g)	
	Bezemeli Yüzey	İç Astar
Al	74700 ± 1400	165606±1700
Ba	2059 ±240	663±60
Ca	43757±950	91857±1070
Cr	--	287±40
Cu	41544 ± 240	256±20
Fe	11158±230	44121±400
K	10551±630	18075±620
Mg	6145±1150	12966±1000
Mn	449±120	674±90
Ni	142±40	212±20
P	--	11566±410
Pb	380286±660	1420±30
Pd	--	17±10
Sb	639±80	--
Si	134143±1110	187833±1400
Ti	792±140	7920±260
Y	--	79±10
Zn	498±40	514±20
Zr	1206±60	1014±30

Çizelge 5.3 : 43 No.lu bezemeli seramiğin bezeme ve iç astarının kimyasal kompozisyonu.

Konsantrasyon (µg/g)		
Element	Bezemeli Yüzey	İç Astar
Al	69456±1150	97648±1450
Ba	--	--
Bi	--	297±40
Ca	35800±830	258800±1630
Co	910±70	--
Cr	--	144±40
Cu	752±40	432±30
Fe	2800±120	39536±420
K	27130±900	18373±540
Mg	7478±880	15264±1250
Mn	--	1425±120
Ni	--	55±20
P	--	16609±380
Pb	343147±550	11612±90
Sb	--	93±30
Si	182093±1140	132706±1080
Sn	--	405±30
Ti	354±90	3372±200
Zn	--	209±20
Zr	962±50	806±30

Çizelge 5.4 : 44 No.lu bezemeli seramiğin bezeme ve iç astarının kimyasal kompozisyonu.

Konsantrasyon (µg/g)		
Element	Bezemeli Yüzey	İç Astar
Al	58014 ± 1210	103236 ± 1610
Ba	1209 ± 210	2319 ± 190
Bi	13497 ± 340	4728 ± 170
Ca	9443 ± 480	92079 ± 1280
Cr	--	157 ± 40
Cu	16072 ± 150	440 ± 30
Fe	4767 ± 160	47152 ± 460
K	7346 ± 550	20691 ± 780
Mg	3275 ± 1070	20227 ± 1360
Mn	--	6042160 ± 120
Nb	--	1450 ± 70
Ni	--	94 ± 30
P	--	13710 ± 380
Pb	544828 ± 790	165721 ± 400
Sb	287 ± 60	--
Si	106386 ± 920	148307 ± 1240
Sn	273 ± 70	-
Ti	888 ± 130	2778 ± 200
Zn	--	217 ± 20
Zr	1102 ± 70	1324 ± 60

Renklendiriciler seramik bir ürüne; gövde renklendiricisi, astar, sır altı boyası, renkli sır ve sır üstü boya gibi farklı yollarla uygulanabilmektedir. Gövde renklendiricisi, doğrudan seramik gövde bileşimine eklenir. Bu yolla renklendiricinin eklenmesi, ürünün fırınlanması sırasında sıcaklık farklanmalarından dolayı gölgelenmeye neden olabilir. Astarlar ise pişmemiş gövdeye uygulanan renkli çamurlardır. Sır altı boyaları gövdeye sırlama öncesi uygulanır. Boya maddeleri doğrudan sır bileşimine de uygulanabilir bu şekilde renkli sır elde edilir. Sır üstü boyaları ise sırlanmış ve pişirilmiş ürüne uygulanır. Sır üstü boyalarının kararlı hale getirilmesi için bezeme pişimi adı verilen bir ısıtma işlemi uygulanır. Seramik boya maddeleri, bunların uygulamasında kullanılan ergitme katkılarına karşı dayanıklı olmalıdır. Sır üstü bezemelerde yaygın olarak kullanılan PbO ergitme katkıları bozunduruca etkiye sahiptir. Endüstride en çok kullanılan sır bileşimleri: PbO, CaO, Na₂O, ZnO, MgO, Na₂O, K₂O, Al₂O₃, SiO₂, B₂O₃'dir.

Bir seramik renklendirici yalnızca renk verici oksitten oluşmamaktadır. Renklendiriciye, genellikle düzenleyiciler, seyrelticiler ve ergitme katkıları eklenir. Örneğin, kobalt mavisi veya kraliyet mavisi olarak adlandırılan renklendirici: kobalt, kireçtaşı, kum ve alümina, feldispat bileşenlerinden oluşur.

Renklendiricide doygunluk, belli bir rengin yoğunluğudur ve rengin aralığı ile bağlantılıdır. Tam olarak doymuş bir renk canlı ve parlaktır (Bengisu, 2006).

Seramik buluntularda bezemelerde saptanan Fe içeriği, hematit pigmentinden kaynaklanmaktadır. Bezemeli kısımda demir, Fe₂O₃ (hematit) formunda olduğunda kahverengi, Fe kromit spinel formunda kahverengi, Cr-Fe-Mn spinel formunda kahverengi, Zr-Fe zirkon (mercan) formunda pembe, PrFeZrSi formunda kavuniçi, PrVFeZrSi formunda haki ya da nane yeşili, FeZrSi formunda mercan, FeVZrSi formunda gri kahve, Fe[Fe(CN)₆]₃ (Prusya mavisi) formunda mavi renktir. Seramik buluntularında, %0.6-1.5 arasında Fe₂O₃ bulunmuştur.

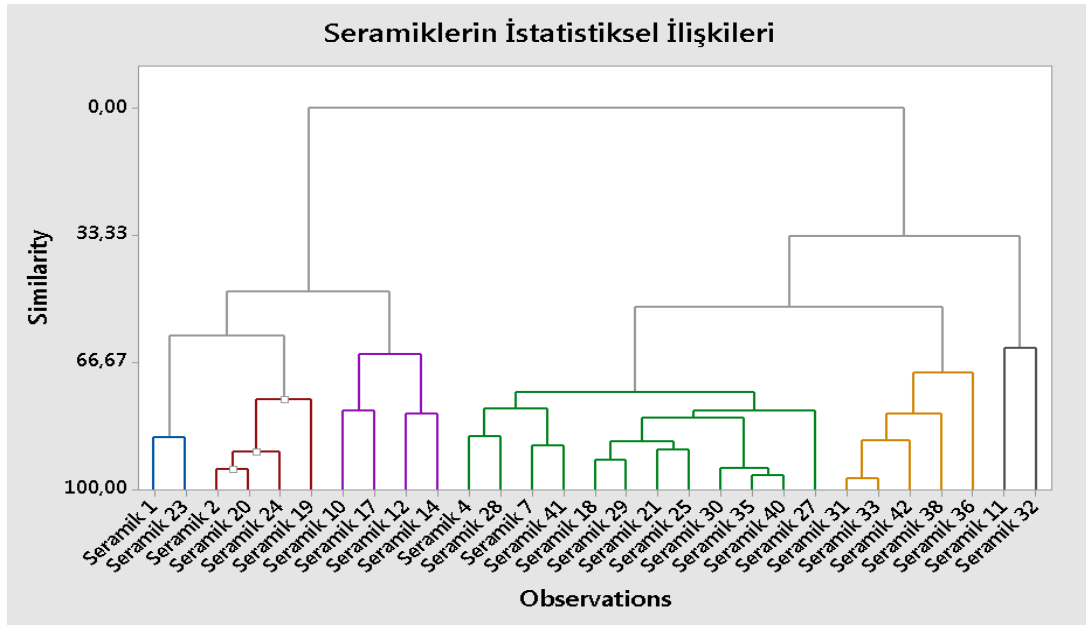
Bezemelerde dikkati çeken en önemli husus, kurşun içeriğinin çok yüksek olmasıdır. Kurşun, canlı metabolizması için toksik olarak kabul edilmektedir. Bezemelerde, %40 ila %59 arasında değişen PbO içeriği saptanmıştır. PbO içeriği iç astar ile karşılaştırıldığında bezemede yaklaşık 40 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kurşunun sırlama malzemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bezemelerde rastlanan sarı renk kurşundan kaynaklanmaktadır.

Bu sonuç, Bizans dönemindeki ölümlerin kurşun zehirlenmesinden kaynakladığı teorisini de desteklemektedir.

34 No.lu bezemeli seramik buluntusunda bakır içeriği bezeme %5 ile en yüksek miktarda bulunmuştur. 43 ve 44 No.lu bezemelerde ise sırasıyla %0.1 ve %2 CuO saptanmıştır. Renklendiricilerde Cu kromit spinel, siyah renk elde etmede kullanılmaktadır.

5.2 İstatistiksel Analiz Sonuçları

Yenikapı kazılarından ele geçen seramiklere ait kantitatif sonuçlar vaziyet planında ilk bulunduğu noktalarla karşılaştırılmak üzere istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Minitab 17.0 istatistik programından yararlanılarak hiyerarşik kümeleme analizi (HCA) uygulanmıştır. Bu sayede, dendrogram grafikleri ve kümeleme planı (agglomeration schedule) elde edilerek istatistiksel sonuçlar yorumlanmıştır. İstatistiksel analiz için kullanılan yöntemde örnekler benzerliklerine göre değerlendirilmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : Seramiklerin hiyerarşik kümelenmesi.

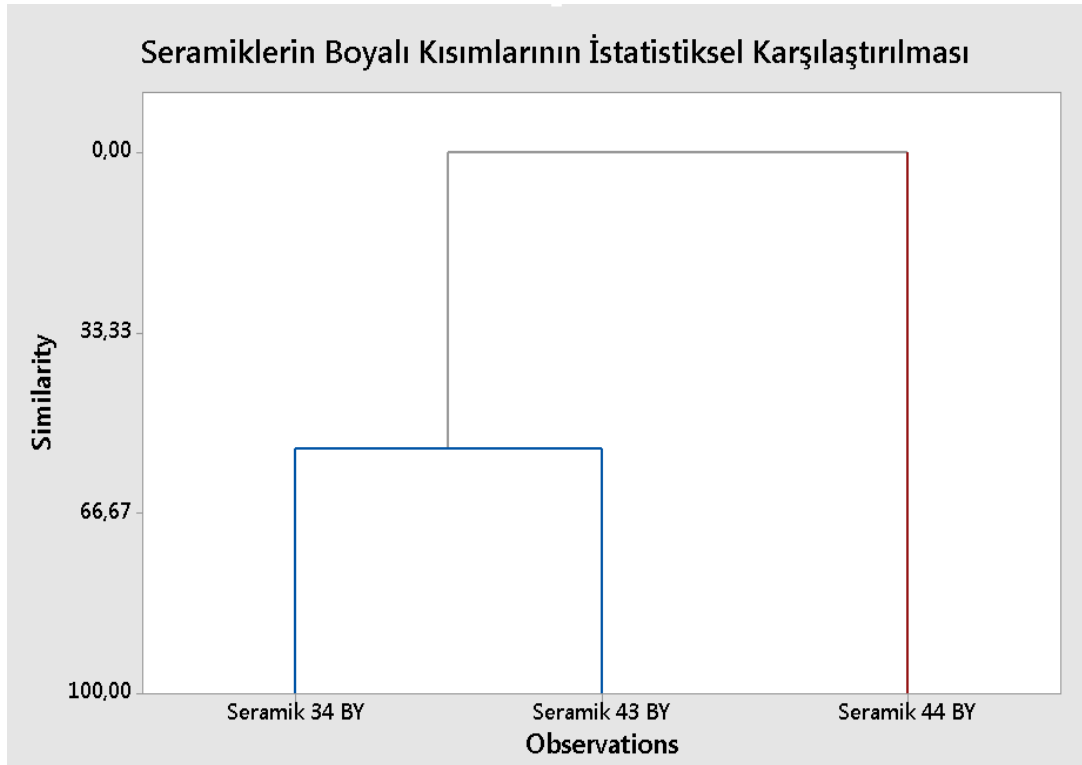
Yapılan istatistiksel analiz değerlendirmelerine göre 6 adet kümeleme oluşmuş, bu kümelerle ait seramiklerin dendrogram grafiği ve kümeleme verilerine ait sonuçlar verilmiştir. Küme 1 ve 2 için iki seramik, Küme 3 için on iki seramik, Küme 4 için dört seramik, Küme 5 için iki seramik ve Küme 6 için beş seramik örneğinin

aralarında gruplaştığı görülmüş ve her bir kümenin kendi içinde ve diğer kümelerle olan ilişkisi gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 : Dendograma ait kümeleme verileri.

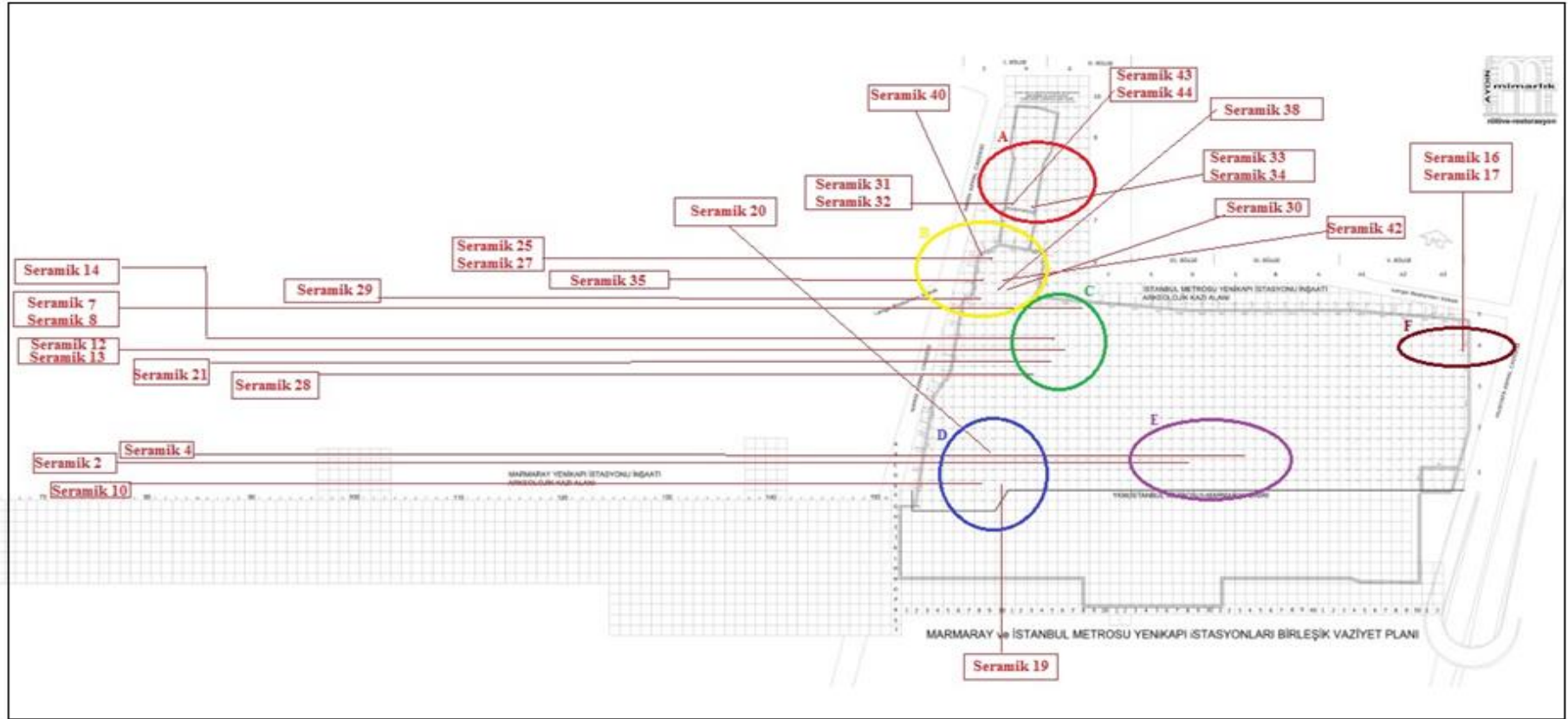
Adım	Küme Sayısı	Benzerlik Seviyesi	Uzaklık Seviyesi	Küme Bağlantıları	Yeni Küme	Yeni Kümedeki Gözlemler
Step	Numb. of Cluster	Similarity Level	Distance Level	Clusters Joined	New Cluster	Numb. of obs. in new cluster
1	28	96.205	6464	21 23	21	2
2	27	96.2160	7942	24 27	24	2
3	26	94.6008	11333	2 12	2	2
4	25	94.3295	11902	20 24	20	3
5	24	92.2868	16190	10 19	10	2
6	23	90.1491	20677	2 15	2	3
7	22	89.3898	22270	13 16	13	2
8	21	88.3585	24435	4 28	4	2
9	20	87.4573	26326	10 13	10	4
10	19	87.0298	27224	21 29	21	3
11	18	86.3533	28644	1 14	1	2
12	17	85.9814	29424	3 18	3	2
13	16	81.2324	39392	10 20	10	7
14	15	80.0429	41889	7 8	7	2
15	14	79.9650	42052	21 26	21	4
16	13	79.4036	43231	5 9	5	2
17	12	79.2436	43566	10 17	10	8
18	11	78.6521	44808	3 4	3	4
19	10	76.2266	49899	2 11	2	4
20	9	74.3421	53854	3 10	3	12
21	8	69.3054	64426	21 25	21	5
22	7	64.4224	74675	5 7	5	4
23	6	62.9958	77670	6 22	6	2
24	5	59.6810	84627	1 2	1	6
25	4	52.0243	100698	3 21	3	17
26	3	48.0917	108952	1 5	1	10
27	2	33.5471	139481	3 6	3	19
28	1	0.0000	209894	1 3	1	29

Şekil 5.6’da verilen vaziyet planı üzerindeki kümelemeyle uygun sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre; benzerlik oranı en çok olan seramikler 31 ve 33 No.lu seramikler %96 şeklinde olmuştur. Bunun yanında, 30, 35 ve 40 No.lu seramikler üçlü bir bağlantı oluşturmak üzere kendi içinde %92 oranında bir benzerlik göstermiştir. 2 ve 20 No.lu seramikler ise %94 oranında benzerlikleriyle dikkat çeken kümelerin başında gelmiştir. %63 en az benzerlik oranı ve kümeleme açısından birbirleriyle en az bağlantısı olan küme 11 ve 32 No.lu seramiklerin oluşturduğu Küme 5’tir.



Şekil 5.5 : Bezemeli numunelerin dendogramına ait kümeleme verileri.

Sırlı seramiklere ait yapılan analizlerle karşılaştırılmak üzere; elementsel oranlara dayalı benzerlik kümelemesi yapılmış ve 34 ve 43 No.lu seramiklerin benzerlik bakımından bir grup oluşturduğu, 44 No.lu seramik için ise değerlerin farklı olduğu saptanmıştır. Bu sonuçtan yola çıkılarak, her ne kadar elementsel çeşitlilik benzerlik gösterse de, 44 No.lu seramike ait boya malzemesi, 34 ve 44 No.lu seramiklere nazaran oransal açıdan farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.6 : İstatistiksel sonuçların Yenikapı kazısı vaziyet planı üzerindeki dağılımı.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Seramik insanların kullandığı en eski gereçlerden biridir. Yüzyıllar boyunca, özellikle kap-kacak yapımında seramiğin üstün niteliğinden yararlanılmıştır. Hammadde bolluğu, kolay işlenebilme, basit imalat, nispeten düşük maliyet, kullanma rahatlığı v.b. avantajlarının yanında, sertliği, sıcağa dayanıklılığının kırılma dayanıklılığı yanındaki olumlu etkileri kullanım alanlarını önemli kılmaktadır. Günümüz seramikleri, klasik seramiklerin niteliklerini taşımakla beraber, yeni mekanik yetenekler edinmiş olan teknik seramikleri de kapsamaktadır. Bugün seramiğin ısıl sanayi seramikleri, yapısal seramikler ya da ince seramikler gibi çeşitleri de bulunmaktadır. Tüm bu türlerde; ana madde mineral kökenlidir ve toz halinde işlenir, eşyaya son şeklini vermek için sıkıştırma ve pişirme gibi iki aşamalı bir işlem uygulanır.

Hakkında filolojik bilgi bulunmayan ya da yetersiz bilgi olan çağlarda yaşayan toplumlar hakkında bilgi veren pek çok kültür kalıntısı içinde en önemli buluntu grubu olan seramiğin vereceği bilgiler, insanlık tarihinin anlaşılmasını sağlayan önemli ipuçlarını oluşturmaktadır. Seramik hamurunun yapısı, pişirme ve biçimlendirilme teknikleri, kap biçimleri ve yüzey görünüşleri incelendiğinde, kullanıldıkları çağın toplumlarının gereksinimleri, ulaştıkları teknoloji düzeyi, beğenileri, farklı toplumların birbirleriyle olan ilişkileri, sosyal ve etnik farklılıkları, bu toplumların yaşadıkları bölgenin sınırları ve yaşam süreçleri de anlaşılabilir (Ökse, 2002).

Bu çalışmada, Yenikapı metro ve Marmaray çalışmaları sırasında tesadüfen bulunan birçok arkeolojik buluntudan kazı bölgesinin farklı katmanlarında bulunan ve bu katmanları temsilen İstanbul Arkeoloji Müzesi Müdürlüğü tarafından izinli olarak verilen etütlük seramik buluntular nükleer teknikler ile analiz edilerek kimyasal yapıları aydınlatılmaya çalışılmıştır.

Nükleer tekniklerle elde edilen veriler, istatistiksel yöntemler kullanılarak değerlendirilmiş; bu yöntemlere dayalı yorumların, deneysel sonuçlar ve literatür ile

uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Buna rağmen, istatistiksel açıdan, dönemler içerisinde hiçbir kümeye uymayan seramik parçalarının köken olarak yakın veya uzak bölgelerden gelmiş olan ithal malzeme olabileceği düşünülmektedir. Theodosius Limanı'nın tarihte aktif ticaret bölgelerinden biri olduğu, farklı kültür ve coğrafyalara ait malların bu bölgede toplandığı düşünüldüğünde, seramiklerin çeşitlilik özellikleri ve bileşim bakımından farklılık göstermesi kaçınılmaz olacaktır.

XRF tekniğı ile sırlı seramiklerin boyalı ve boyasız kısımları ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analiz koşulları, hedef elementlerin belirlenmesine yönelik uygun şekilde ayarlanmıştır. XRF analiz sonuçlarındaki en dikkat çekici nokta, seramiklerin sırlı yüzeylerin elementsel bileşimdeki kurşun oranının, sırlı olmayan iç kısımlarına nazaran çok yüksek miktarda olmasıdır. Bu sonuçtan yola çıkılarak, sırlama yapımında kullanılan malzemelerin ana bileşenin kurşun olduğu belirlenmiştir. Kurşunun sırlı eserlerde diğer elementlerin oranlarına göre çok olması bir çok yorumu beraberinde getirmiştir.

Literatür araştırmalarına göre, yapılan Bizans dönemi seramik araştırmalarında, sırsız kapların neredeyse yok sayıldığı, yayınlarda amphora dışındaki türlere genellikle yer verilmediği görülmektedir. Sırlama tekniğine Roma döneminde geçildiği ve hemen hemen Erken Bizans Dönemi tüm seramiklerine uygulandığı, sırlanmamış seramiklerin rağbet görmediği bilinmektedir. Bizans seramiklerinde kullanılan sır, kurşunlu sırdır ve bu sır özellikle kurşun oksit ve silisten oluşmaktadır (Türker, 2004).

9-12. yüzyıllarda Çin'de ve Bizans'ta kalker içermeyen killer ile kombine edilmiş kurşun oksit kullanımı, birbirinden bağımsız her iki bölgede oluşan yeni teknolojik bir gelişim olarak kabul edilmektedir. Bu gelişme, kurşun oksit-kuartz karışımının kullanımının bir göstergesi kabul edilmektedir. Bizanslıların daha sonra kalkerli killerle kombine kurşun oksit kuartz kullanımı, 8. ve 9. Yüzyıllarda bu teknolojiyi kullanan müslüman seramik ustalarından bu teknolojiyi transfer etmelerine bağlanmaktadır (Walton, 2010).

Tüm bu yorumlamalar ve araştırmalar ışığında, sonuç olarak Bizans seramiklerin sır bileşenlerinde kurşun olması ve yapılan arkeolojik araştırmalara göre Bizans dönemine ait seramiklerde sırlamanın yaygın biçimde kullanılması, bu dönemde, kapsamlı ve gelişmiş bir seramik üretim merkezinin varlığına işaretir. Yapılan

kazılarda bugüne dek ele geçen eserlerin işçilik açısından ve sır çeşitliliği farklılık göstermesi de, sırlamanın bir sanat uğraşı şeklinde yapıldığının bir göstergesidir. Elde edilen verilerden, Erken Bizans döneminde seramik üretimi bir sanat haline gelmiş ve sırlama tekniği gelişmiş olmasına rağmen seramik pişirme tekniğinin henüz çok gelişmediği hala düşük sıcaklıkta (500-700°C) pişirmenin yaygın olduğu söylenebilir.

Yeşil sır içeren 44 No.lu seramik örneğinin renk oluşumunda bakır silikat ve demir silikatın etkin olduğu kesindir (Caley, 1947). Diğer taraftan renklendirici olarak kullanılan elementlerden olan bakırın, Erken Roma Döneminden itibaren pigment olarak ilâve edilerek, kalay bronzu olarak kullanıldığı yapılan çalışmalarla anlaşılmıştır. Bu durum, sırdaki kalayın bakıra (Sn/Cu) oranının %10-20 arasında oluşu ile desteklenmektedir (Hatcher, 1994). 44 No.lu seramik örneğinde de Sn/Cu oranı %20 dolayındadır.

Sırlı seramik kap, özellikle içki kabı olarak kullanıldığında içkideki asidik ortam kurşunu çözmekte ve zamanla kurşun zehirlenmesine yol açmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalarda, sır bileşimindeki bazik ve asidik oksitlerin oranının önemli olduğu anlaşılmıştır. Bazik ve asidik oksitlerin oranı 2'nin altında olmalıdır (Singer ve German, 1974). Bu durum, kurşunun daha az çözünmesi dolayısıyla zehirleyici etkisinin oldukça düşük olduğu anlamına gelmektedir.

Daha sonra yapılacak olan çalışmalarda, seramik buluntularının XRD analizlerinin gerçekleştirilerek içerdikleri kil minerallerinin kesin vurgulamasının yapılması ve buna bağlı olarak seramik buluntularının kökenlerinin aydınlatılması hedeflenmektedir.

İngiltere'de British Museum'da 1978'den 2002 yılına kadar müzede sergilenen seramik ve mermer buluntuların kaynağını araştırmada nükleer bir analiz tekniği olan nötron aktivasyon analizi yöntemi kullanılarak 24 yıl süren analitik bir çalışma programı uygulanmıştır. Bu amaçla, sadece arkeolojik buluntuların analiz edilmesi için müze yakınına bir nükleer reaktör kurulmuş ve çalışmalar kesintisiz sürdürülmüştür (Hughes, 2007).

Günümüzde tarihi eserlerin incelenmesi ve değerlendirilmesinin sadece arkeologlar, tarihçiler ve sanat tarihçilerinin görevi olmadığı birçok bilim dalının bu alanda katkı sağlayacağı kabul edilmektedir. Tarihe ışık tutacak bu tür çalışmalarda, en az sosyal

bilimciler kadar pozitif bilimlerle uğraşanlarında katkısı olacaktır. Bu amaçla başlatılan bu çalışmada elde edilen veriler, bu tür çalışmaların arkeolojik buluntuların kökenlerinin saptanmasında önemli olduğunu vurgulamaktadır.

KAYNAKLAR

- Algan, O., Yalçın, M.N., Özdoğan, M., Yılmaz, Y., Sarı, E., Kırıcı-Elmas, E., Yılmaz, İ., Bulkan, Ongan, D., Gazioğlu, C., Atike, N., Polat, M.A., Meriç, E., (2011).** Holocene Coastal Change in the Ancient Harbor of Yenikapı–İstanbul and Its Impact on Cultural History, *Quaternary Research*, **76**, 30–45.
- Arslan, T. H., (2010).** X-Işınları ve Kullanım Alanları, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Bacon, G. E. (1969).** Neutron Physics. *Wykcham Publications, See also Phys.* London.
- Bengisu, M., (2006).** Seramik Bilimi ve Mühendisliği, *Nobel Yayıncılık*, s:746.
- Bertin, E.P., (1984).** Principle and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis, *Second Edition Fourth Printing, Plenum Press*, New York,London.
- Bilgiç, E., (2013).** Erken Bizans Dönemi I, *Mediterranean Journal of Humanities*, **III/2**, s:341-344.
- Brouwer, P., (2006).** Theory of XRF, Getting Acquainted with Principles, (ISBN: 90-9016758-7), 3rd Edition.
- Chopin, G.R., Lişjenzin, J., Rydberg, J., (2002).** Radiochemistry and Nuclear Chemistry, *Butterworth-Heinemann, Third Edition*, s:709. USA.
- Donat, R., (2003).** Uranyumun Ayrılmasında Alg-Kil Kompozit Adsorbanların Geliştirilmesi Ve Uygulama Alanlarının İncelenmesi, (doktora tezi), Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nükleer Bilimler Anabilim Dalı.
- Ender, B., (2006).** Erzincan (Büyükardıç) ve Erzurum (Güllüdere, Tasmasor, Tetikom ve Mağaratepe) Kazılarında Ele Geçen Demir Çağına ait Seramiklerin XRF Tekniği ile İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Koç, P., (2009).** Diyarbakir-Bismil Aşağı Salat Höyüğü’nde Ele Geçen Çeşitli Dönemlere ait Seramiklerin Kökenlerinin X-ışınları ile Tayinleri, Gazi Üniversitesi, Ankara,
- L’Annunziata, M.F., (1998).** Handbook of Radioactivity Analysis, Academic Press, (ISBN: 0-12-436225-9).
- L’Annunziata, M.F., (2007).** Radioactivity, Introduction and History, *First Edition*, Netherlands.
- Hedges, R.E.M., (1979).** Archaeological Evidence from Chemical Analysis, *International Laboratory*, May/June, 111-119.
- Hughes, M.J., (2007).** Neutron Activation Analysis at The British, Museum, London, *Archaeometry*, **49(2)**, 255–270, United Kingdom.

- Kızıltan, Z., Polat, M.A.,** (2013). Yenikapı Kurtarma Kazıları: Neolitik Dönem Çalışmaları, *Arkeoloji ve Sanat*, s:143.
- Koç, P.,** (2009). Diyarbakir-Bismil Aşağı Salat Höyüğü'nde Ele Geçen Çeşitli Dönemlere ait Seramiklerin Kökenlerinin X-Işınları ile Tayinleri, Gazi Üniversitesi, Ankara,
- Martin, J.E.,** (2006). Physics for Radiation Protection, A Handbook, *Wiley-Vch, Verlag GmbH & Co. KGaA*, (ISBN: 3-527-40611-5).
- Meriç, N.,** (1990). Nötron Aktivasyon Analizi ile Madde Tayini, (Yüksek Lisans Tezi), *Ankara Üniversitesi*, Ankara.
- Neff, H.,** (2000). Neutron Activation Analysis For Provenance Determination In Archaeology, *University of Missouri Research Reactor Center*, University of Missouri, Columbia, Missouri, U.S.A.
- Okse, A.T.,** (2002). Arkeolojik Çalışmalarda Seramik Değerlendirme Yöntemleri, *Arkeoloji ve Sanat Yayınları*, s:188.
- Ozturk, Y.E.,** (2012). Kil mineralleri açısından ince daneli zeminlerin fiziko-kimyasal özellikleri ile kıvam limitleri arasındaki ilişkiler, Y. Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Niğde.
- Parry, S. J.,** (1991). Activation Spectrometry in Chemical Analysis, Imperial College Reactor Centre, Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London.
- Seyrek, E.,** (2007). Radyoizotopların Üretimi ve Radyoterapide Kullanılması, Gazi Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Anabilimdalı, Ankara.
- Şenyiğit, M.,** (2011). Nükleer Reaksiyonlar Sonucu Açığa Çıkan Gama Işınları ve Nötronların Germanyum Detektör Sistemi ile Etkileşimleri, (Doktora Tezi), Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Tuğrul, A.B.,** (1986), A.N. Bilge, B. Tuğrul, “Sanayide Uygulamalı Radyografi”, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Sınai Eğitim ve Geliştirme Bakanlığı, Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi (SEGEM) Genel Müdürlüğü, İstanbul.
- Tuğrul, A.B.,** (2013). Radyasyon Fiziği Ders Notları, İTÜ Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Turner, J.E.,** (1995). Atoms, Radiation, and Radiation Protection Third Edition, ISBN: 0-471-59581-0, United States of America.
- Türker, A.,** (2004). Bizans Dönemi Günlük Kullanım Kaplarına Ait Yayınlar ve Değerlendirme Yöntemleri, *Hacettepe Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Dergisi*, 2004 **21**, 209-228.
- Walton, M.S.,** (2010). Tite, M.S., Production Technology of Roman Lead-Glazed Pottery and its Continuance Into Late Antiquity, *Archaeometry*, **52**(5), 733–759.
- Willard H., Dean, J., Merrit, Jr. L., Settle, Jr. F.A.,** (1981) Instrumental Methods of Analysis, Sixth Edition, Van Nostrand Co., New York.
- Yılmaz, Y., Gökaşan, E., Erbay Y.,** (2010). Morphotectonic development of the Marmara Region, *Tectonophysics*, **488**, 51–70.

- Url-1** <http://tr.wikipedia.org/wiki/Elektromanyetik_tayf>
alındığı tarih : 02.11.2014.
- Url-2** <<http://www.ehs.utoronto.ca/services/radiation/radtraining/module3.htm>>
alındığı tarih : 04.12.2014.
- Url-3** <<http://serc.carleton.edu/details/images/8971.html>> alındığı tarih:
04.05.2013.
- Url-4** <[http:// www.nuclearmalaysia.gov.my/Plant&Facilities/reactor.php](http://www.nuclearmalaysia.gov.my/Plant&Facilities/reactor.php) >
alındığı tarih: 11.09.2014.
- Url-5** <<http://www.panalytical.com/Home.htm>>, alındığı tarih : 05.11.2014.
- Url-6** <[https://bunubenbugunogrendim.wordpress.com/tag/enerji-dagilimli-x
isinifloresans-teknigi/](https://bunubenbugunogrendim.wordpress.com/tag/enerji-dagilimli-x-isinifloresans-teknigi/)>, alındığı tarih : 05.10.2014.
- Url-7** <http://www.ltrc.lsu.edu/ltrc_13/pdf/presentations/>,
alındığı tarih : 5.11.2014.
- Url-8** <[http://www.pharmaceuticalonline.com/doc/spectrometer
characterization-analysis-0001](http://www.pharmaceuticalonline.com/doc/spectrometer-characterization-analysis-0001)>, alındığı tarih : 05.11.2014.
- Url-9** <[http://www.istanbularkeoloji.gov.tr/web/41-225-1
1/muze_tr/muze/kazilar/yenikapi_kazilari](http://www.istanbularkeoloji.gov.tr/web/41-225-11/muze_tr/muze/kazilar/yenikapi_kazilari)>, alındığı tarih : 05.06.2014.
- Url-10** < <http://www.repamet.com/xrfalasim.htm>>, alındığı tarih : 05.11.2014.
- Url-11** < [http://www.eurekalert.org/pub_releases/2007-10/asu
rfe101207.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2007-10/asurfe101207.php)>, alındığı tarih: 01.11.2014.
- Şahin, L.,** (2014). Parçacıklar ve radyasyonun madde ile etkileşmesi, alındığı tarih:
25.10.2014, <<http://trdocs.org/download/docs-12946/12946.doc>>

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ahmet Hamdi VARAN

Doğum Yeri ve Tarihi: Merkez/BİNGÖL-1989

E-Posta: ahvaran@gmail.com

Lisans Üniversitesi: İnönü Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

2011-2012 : İnönü Üniversitesi Pedagojik Formasyon Eğitim Sertifikası, Malatya

2014- Halen: İTÜ Enerji Enstitüsü Yarı-zamanlı Asistan-Öğrenci

Yayın Listesi: