PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAODİKEİA (DENİZLİ-GB TÜRKİYE) ANTİK KENTİ TAPINAK-A (SEBASTEİON) YAPISINDA KULLANILAN MERMERLERİN MİNERALOJİK PETROGRAFİK JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ VE KAYNAK ALANLARININ BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sanem KILINÇARSLAN

Anabilim Dalı : Jeoloji Mühendisliği

Programı : Yüksek Lisans

Tez Danışmanı: Doç.Dr.Tamer KORALAY

ARALIK 2013

YÜKSEK LİSANS TEZ ONAY FORMU

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 091149014 nolu öğrecisi Sanem KILINÇARSLAN tarafından hazırlanan "**LAODİKEİA (DENİZLİ-GB TÜRKİYE) ANTİK KENTİ TAPINAK-A (SEBASTEİON) YAPISINDA KULLANILAN MERMERLERİN MİNERALOJİK PETROGRAFİK JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ VE KAYNAK ALANLARININ BELİRLENMESİ**" başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Doç.Dr.Tamer KORALAY (PAÜ)**

Jüri Üyesi : **Prof.Dr.Yusuf Kağan KADIOĞLU (AÜ)**

Jüri Üyesi
(Jüri Başkanı): **Prof.Dr.Mehmet ÖZKUL (PAÜ)**

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/01/2014 tarih ve ...06/10... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Nuri KOLSUZ

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

İmza

Öğrenci Adı Soyadı : Sanem KILINÇARSLAN

ÖNSÖZ

Eski uygarlıklara ait yerleşimlerin oldukça fazla olduğu Anadolu coğrafyasında arkeolojik anlamda yürütülen birçok kazı ve bu kazılar sonucu yazılan birçok yayın bulunmaktadır. Tez konusunu oluşturan Laodikeia antik kentiyle ilgili kazı çalışmalarının anlatıldığı yayınlar oldukça fazla olmasına rağmen yapılarda kullanılan mermerlerin özellikleri ve nereden geldiklerine dair konular belirsiz kalmıştır. Bu sorunu çözemeye yönelik olarak kentteki en ihtişamlı yapılardan olan Tapınak-A yapısında kullanılan mermerler üzerinde mineralojik-petrografik ve jeokimyasal özellikleri ile O ve C izotop bileşimlerine yönelik ayrıntılı bir çalışma yapılarak litaretüre katkı sağlanmaya çalışılmıştır.

Yüksek Lisans çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, ilgi ve desteğini gördüğüm, fikirleriyle yol gösteren, her yönüyle örnek almaya çalıştığım değerli akademik danışmanım Sayın Doç. Dr. Tamer KORALAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Laodikeia antik kentini tekrar gün ışığına çıkaran ve tez çalışmamız boyunca kent ile bilgi veren Sayın Prof. Dr. Celal ŞİMŞEK'e, Helenistik ve Roma Dönemi Mimarisi hakkında bilgi ve desteğini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Bilal SÖĞÜT'e, antik kente ziyaretlerimiz sırasında bizi yalnız bırakmayan Yrd. Doç. Dr. Bahadır DUMAN, Arş.Gör.Barış YENER ve Arş.Gör.M.Ayşem SEZGİN'e, istatistik konularında yardımcı olan Prof. Dr. Beyza AKDAĞ, Arş. Gör. Hande ŞENOL ve Yrd. Doç. O. Andım BALCE'ye, arazi çalışmaları sırasında bilgi ve deneyimleriyle destek sağlayan çok değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Halil KUMSAR ve Prof. Dr. Mehmet ÖZKUL'a, arazi çalışmalarında ve sonrasında her türlü yardımcı olan öğrenci arkadaşım Ç. Zeynep ŞENEL'e, beni her zaman destekleyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Aralık 2013

Sanem KILINÇARSLAN
Kimyager

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET…… xii
SUMMARY…….. xiii
1. GİRİŞ……... 1
1.1 Araştırmanın Amacı……. 1
1.2 Uygulanan Yöntemler…….. 1
1.3 İnceleme Alanlarının Konumu…… 3
2. BÖLGESEL JEOLOJİ…….. 5
2.1 Önceki Çalışmalar……... 7
3. LAODİKEİA ANTİK KENTİNİN TARİHÇESİ……. 24
3.1 Tapınak-A (Sebasteion) Yapısının Özellikleri…… 26
4. LAODİKEİA KENTİ TAPINAK-A (SEBASTİON) YAPISI MERMERLERİNİN MİNEROLOJİK, PETROGRAFİK, JEOKİMYASAL VE DURAYLI İZOTOP ÖZELLİKLERİ……. 30
4.1 Laodikeia Tapınak-A Yapısı Mermerlerinin Makroskopik Özellikleri…… 30
4.2 Laodikeia Tapınak-A Yapısında Kullanılan Mermerlerin Mikroskop Özellikleri……... 32
4.2.1 Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan mermerlerin maksimum tane boyu (Maximum Grain Size-MGS) ölçümleri…….. 35
4.3 Laodikeia Tapınak-A Yapısında Kullanılan Mermerlerin XRD İncelemeleri…… 39
4.4 Konfokal Raman Spektroskopi (Confocal Raman Spectroscopy-CRS) İncelemeleri……. 40
4.4.1 CRS teorisi……. 40
4.4.2 Tapınak-A yapısı mermer örnekleri CRS çalışmaları……..… 43
4.5 Laodikeia Tapınak-A Yapısında Kullanılan Mermerlerin Jeokimyasal Özellikleri……... 49
4.5.1 Ana oksit ve iz element özellikleri……... 49
4.5.2 Kimyasal analiz verilerinin ayrışım fonksiyonu analizi…….. 55
4.6 Tapınak-A Yapısı Mermer Örneklerinin Duraylı İzotop (C ve O) Jeokimyası…….. 58
5. LAODİKEİA ÇEVRESİ ANTİK OCAKLARINDAKİ MERMERLERİN MİNEROLOJİK, PETROGRAFİK, JEOKİMYASAL VE DURAYLI İZOTOP ÖZELLİKLERİ…….. 63
5.1 Hierapolis (Pamukkale) Antik Ocaklarının Jeolojik Yapısı……... 63
5.1.1 Hierapolis (Pamukkale) antik ocağı mermerlerinin makroskopik özellikleri…….. 67

5.1.2 Hierapolis (Pamukkale) antik ocağı mermerlerinin mikroskopik özellikleri…….…….. 69
5.1.2.1 Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin MGS ölçümleri…….…….. 71
5.1.3 Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin XRD incelemeleri…….. 72
5.1.4 Hierapolis antik ocaklarındaki mermer örneklerinin jeokimyasal özellikleri…….……... 74
5.1.4.1 Ana ve iz element özellikleri……..……... 74
5.1.4.2 Kimyasal analiz verilerinin ayrışım fonksiyonu analizi……..…….. 79
5.1.5 Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin duraylı izotop (C ve O) jeokimyası……..……... 82
5.2 Domuzderesi (Yeşilköy) Antik Ocaklarının Jeolojik Yapısı……... 84
5.2.1 Domuzderesi ocaklarındaki mermerlerin makroskopik özellikleri…….…… 86
5.2.2 Domuzderesi ocaklarındaki mermelerin mikroskopik özellikleri……. 88
5.2.2.1 Domuzderesi antik ocakları mermer örneklerinin MGS ölçümleri…….…… 90
5.2.3 Domuzderesi antik ocakları mermer örneklerinin XRD incelemeleri…….. 91
5.2.4 Domuzderesi ocaklarındaki mermer örneklerinin jeokimyasal özellikleri…….…… 93
5.2.4.1 Ana ve iz element özellikleri……..... 93
5.2.4.2 Kimyasal analiz verilerinin ayrışım fonksiyonu analizi…….……... 98
5.2.5 Domuzderesi antik ocakları mermer örneklerinin duraylı izotop (C ve O) jeokimyası……..…… 100
5.3 Afrodisias (Karacasu-Aydın) Antik Ocaklarının Jeolojik Yapısı…... 103
5.3.1 Afrodisias (Karacasu-Aydın) antik ocakları mermerlerinin makroskopik özellikleri…….…….. 107
5.3.2 Afrodisias Antik Ocakları Mermer Örneklerinin Mikroskopik Özellikleri…….…….. 108
5.3.2.1 Afrodisias antik ocakları mermer örneklerinin MGS ölçümleri…….……. 111
5.3.3 Afrodisias antik ocakları mermer örneklerinin XRD incelemeleri……..…… 112
5.3.4 Afrodisias ocaklarındaki mermer örneklerinin jeokimyasal özellikleri……. 112
5.3.4.1 Ana ve iz element özellikleri……..…... 112
5.3.4.2 Kimyasal analiz verilerinin ayrışım fonksiyonu analizi……..…….. 118
5.3.5 Afrodisias antik ocakları mermer örneklerinin duraylı izotop (C ve O) jeokimyası…….……... 120
6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR……..…… 123
KAYNAKLAR……..…… 136
EKLER…….. 145

KISALTMALAR

XRD	: X-ışınları Difraktometre
CRS	: Confocal Raman Spectrometer
XRF	: X-ışınları Floresans
CF-IRMS	: Sürekli Akış-İzotop Oranı Kütle Spektroskopisi
MGS	: Maksimum Tane Boyu
VSMOW	: Vienna Standart Mean Ocean Water
VPDB	: Vienna PeeDee Belemnite
EPR	: Elektron Paramanyetik Rezonans
C	: Karbon
O	: Oksijen

TABLO LİSTESİ

Tablolar

1.1 : Çalışma alanlarından toplanan ve analiz yapılan kayaç türleri ile sayıları……..... 3
4.1 : Laodikeia mermer örneklerine ait MGS ölçüm sonuçları…… 38
4.2 : CRS' de yaygın olarak kullanılan lazer kaynakları……..... 42
4.3 : Tapınak-A yapısı mermerlerini oluşturan bazı minerallerin standart Raman piklerinin sayısal konumları……..... 44
4.4 : Tapınak-A yapısı mermer örneklerinin Kruskall Wallis H test sonuçları.... 56
4.5 : Tapınak-A yapısı mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizine göre ilk 3 kanonikal ayrışım fonksiyonun eigen değerleri, %varyans ve % kümülatif eigen değerleri..... 57
4.6 : Tapınak-A yapısı mermer örneklerine ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçları…… 60
5.1 : Hierapolis antik ocaklarındaki mermer türlerinin MGS ölçüm sonuçları.... 71
5.2 : Hierapolis mermer örneklerinin Kruskall Wallis H test sonuçları……... 80
5.3 : Hierapolis antik ocakları mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizine göre ilk 2 kanonikal ayrışım fonksiyonun eigen değerleri, %varyans ve % kümülatif eigen değerleri…. 81
5.4 : Hierapolis antik ocakları mermer örneklerine ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçları…… 82
5.5 : Domuzderesi mermer türleri MGS ölçüm sonuçları ……... 90
5.6 : Domuzderesi mermer türlerinin Kruskall Wallis H test sonuçları……..... 99
5.7 : Domuzderesi ocağındaki mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizine göre ilk 2 kanonikal ayrışım fonksiyonun eigen değerleri, %varyans ve % kümülatif eigen değerleri…. 100
5.8 : Domuzderesi mermer türlerine ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçları…..…… 101
5.9 : Afrodisias mermer türlerinin MGS ölçüm sonuçları ……..… 111
5.10 : Afrodisias mermer örneklerinin Kruskall Wallis H test sonuçları…..…... 119
5.11 : Afrodisias ocağındaki mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizine göre ilk 2 kanonikal ayrışım fonksiyonun eigen değerleri, %varyans ve % kümülatif eigen değerleri…. 119
5.12 : Afrodisias mermer türlerine ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçları……... 121
6.1 : Tapınak-A yapısı ve antik mermer ocaklarındaki beyaz renkli mermer örneklerinin makro ve mikro özellikleri……... 125
6.2 : Tapınak-A yapısı ve antik mermer ocaklarındaki beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin makro ve mikro özellikleri……. 126
6.3 : Tapınak-A yapısı ve antik mermer ocaklarındaki gri renkli mermer örneklerinin makro ve mikro özellikleri……... 127
6.4 : Tapınak-A yapısı ve antik mermer ocaklarındaki mermer örneklerinin bazı element içerikleri ve duraylı izotop içeriklerini karşılaştırma tablosu……..… 129

6.5 : Tapınak-A ve antik mermer ocaklarındaki tüm mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizine göre ilk 3 kanonikal ayrışım fonksiyonun eigen değerleri, %varyans ve % kümülatif eigen değerleri…….. 130
6.6 : Akdeniz havzasındaki bazı antik mermer ocaklarındaki mermer örneklerinin makro ve mikro özellikleri……... 134
A.1 : Laodikeia Tapınak-A yapısı beyaz renkli lila-mor damarlı mermerlerin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları…… 145
A.2 : Laodikeia Tapınak-A yapısı beyaz renkli mermerlerin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları……... 147
A.3 : Laodikeia Tapınak-A yapısı beyaz renkli gri damarlı mermerlerin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları…….. 149
A.4 : Laodikeia Tapınak-A yapısı gri renkli mermerlerin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları……... 151
B.1 : Hierapolis antik ocakları beyaz renkli mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları…… 153
B.2 : Hierapolis antik ocakları beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları…… 155
B.3 : Hierapolis antik ocakları gri renkli damarlı mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları……... 157
C.1 : Domuzderesi antik ocakları beyaz renkli mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları……... 159
C.2 : Domuzderesi antik ocakları beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları…… 161
C.3 : Domuzderesi antik ocakları gri renkli mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları…… 163
D.1 : Afrodisias antik ocakları beyaz renkli mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları…… 165
D.2 : Afrodisias antik ocakları beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları…… 167
D.3 : Afrodisias antik ocakları gri renkli mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları……... 169

ŞEKİL LİSTESİ

Şekiller

1.1 : Çalışma alanlarını gösteren üç boyutlu yerbulduru haritası…… 4
2.1 : Denizli Grabeninin sadeleştirilmiş jeoloji haritası…….. 6
3.1 : Laodikeia antik kentinin planı ve Tapınak-A yapısının konumu…… 27
3.2 : Tapınak-A yapısının günümüzdeki görünümü ve D-B kesitli geçmişteki plan tasarımı…… 29
4.1 : Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan beyaz renkli lila-mor damarlı mermer örnekleri ve beyaz renkli mermer örnekleri……... 31
4.2 : Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan beyaz renkli gri damarlı mermer örnekleri ve gri renkli mermer örnekleri…… 32
4.3 : Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan lila-mor damarlı ve beyaz renkli mermerler örneklerinin mikroskop görüntüleri……. 34
4.4 : Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan gri damarlı ve gri renkli mermerler örneklerinin mikroskop görüntüleri……... 35
4.5 : Kutu grafiği ve taşıdığı özellikler…… 37
4.6 : Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan mermer örneklerinin MGS ölçümlerini gösteren kutu grafikleri…… 38
4.7 : Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan beyaz renkli lila-mor damarlı ve beyaz renkli bazı mermer örneklerine ait XRD grafikleri..... 39
4.8 : Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli bazı mermer örneklerine ait XRD grafikleri……. 40
4.9 : CRS'nin ana bileşenleri……... 42
4.10 : Tapınak-A yapısı beyaz renkli lila-mor damarlı mermer örneklerinde görülen mineral türlerine ait Raman spektrumları……... 45
4.11 : Tapınak-A yapısı beyaz renkli mermer örneklerinde görülen mineral türlerine ait Raman spektrumları……. 46
4.12 : Tapınak-A yapısı beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinde görülen mineral türlerine ait Raman spektrumları…… 47
4.13 : Tapınak-A yapısı gri renkli mermer örneklerinde görülen mineral türlerine ait Raman spektrumları……. 48
4.14 : Laodikeia mermer örneklerinin bazı ana oksit element içeriklerine ait kutu grafikleri…….. 50
4.15 : Laodikeia mermer örneklerinin bazı iz element içeriklerine ait kutu grafikleri…….. 52
4.16 : Tapınak-A yapısında kullanılan mermer örneklerinin Melezhik ve diğ. (2008) tarafından geliştirilmiş ayırım diyagramları…… 54
4.17 : Laodikeia Tapınak-A yapısı mermer türleri kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak ayrışım fonksiyon analizi ile iki boyutta kümelenmesi……... 57
4.18 : Tapınak-A yapısı mermer gruplarının C izotop ve O izotop değerleri dağılım grafikleri……. 61

4.19 : $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Tapınak-A yapısı mermer örneklerinin konumu…… 62
5.1 : Hierapolis (Pamukkale) antik ocağı ve civarının jeoloji haritası…… 64
5.2 : Hierapolis antik ocaklarının konumu ve görüntüleri……... 65
5.3 : Hierapolis C ocağında gözlenen yapılar…….. 66
5.4 : Hierapolis antik ocaklarındaki mermerlerin makroskopik görünümleri.... 68
5.5 : Hierapolis antik ocaklarındaki mermerlerin mikroskop görüntüleri……... 70
5.6 : Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin MGS ölçümlerini gösteren kutu grafikleri…….. 72
5.7 : Hierapolis antik ocağı mermer örneklerine ait XRD grafikleri……... 73
5.8 : Hierapolis antik ocakları mermer türlerinin bazı ana oksit element içerikleri gösteren kutu grafikleri…..…….. 75
5.9 : Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin bazı iz element içeriklerini gösteren kutu grafikleri…….. 77
5.10 : Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin Melezhik ve diğ. (2008) tarafından geliştirilmiş ayırım diyagramları…… 79
5.11 : Hierapolis antik ocakları mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak ayrışım fonksiyon analizi ile iki boyutta kümelenmesi……... 81
5.12 : Hierapolis antik ocakları mermer C izotop ve O izotop gruplarının değerleri dağılım grafikleri…….. 83
5.13 : Hierapolis antik ocakları mermer türlerinin $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramındaki dağılımları…….. 84
5.14 : Domuzderesi antik ocaklarının konumu ve arazi görünümleri…….. 85
5.15 : Domuzderesi ocakları mermer örneklerinin arazi ve el örneklerinin görünümleri……..... 87
5.16 : Domuzderesi mermer örneklerinin mikroskop görüntüleri…..……... 89
5.17 : Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin MGS ölçümlerini gösteren kutu grafikler……...… 91
5.18 : Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin XRD grafikleri…….. 92
5.19 : Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin bazı ana oksit element içeriklerini gösteren kutu grafikleri …… 94
5.20 : Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin bazı iz element içerikleri gösteren kutu grafikleri ……... 96
5.21 : Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin Melezhik ve diğ. (2008) tarafından geliştirilmiş ayırım diyagramları…… 97
5.22 : Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak ayrışım fonksiyon analizi ile iki boyutta kümelenmesi…… 100
5.23 : Domuzderesi antik ocakları mermer gruplarının C izotop ve O izotop dağılım değerleri…….. 102
5.24 : $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Domuzderesi ocakları mermer türlerinin dağılımı…… 102
5,25 : Afrodisias antik ocaklarının yerini gösteren topoğrafik harita…… 103
5.26 : Afrodisias antik yerleşimi, antik mermer ocakları ve çevresinin basitleştirilmiş jeoloji haritası…….. 104
5.27 : Afrodisias antik ocaklarının arazi görüntüleri…… 106
5.28 : Afrodisias ocakları mermer örneklerinin arazi ve el örneklerinin görünümleri…….……... 108
5.29 : Afrodisias mermer örneklerinin mikroskop görüntüleri……..... 110

5.30 : Afrodisias antik ocakları mermer türleri MGS ölçümlerini gösteren kutu grafikleri…….. 111
5.31 : Afrodisias antik ocakları mermer türleri XRD grafikleri ……..... 113
5.32 : Afrodisias antik ocakları mermer türlerinin bazı ana oksit element içeriklerini gösteren kutu grafikleri……. 114
5.33 : Afrodisias antik ocakları mermer türlerinin bazı iz element içerikleri gösteren kutu grafikleri…… 116
5.34 : Afrodisias antik ocakları mermer türlerinin Melezhik ve diğ. (2008) tarafından geliştirilmiş ayırım diyagramları…… 118
5.35 : Afrodisias ocaklarındaki mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak ayrışım fonksiyon analizi ile iki boyutta kümelenmesi……... 120
5.36 : Afrodisias antik ocakları mermer gruplarının C izotop ve O izotop değerleri dağılım grafikleri…….. 121
5.37 : $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Afrodisias mermer örneklerinin konumu…… 122
6.1 : Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardaki mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak ayrışım fonksiyon analizi ile iki boyutta kümelenmesi…… 130
6.2 : $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardaki mermer türlerinin konumu……... 131
6.3 : $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardaki mermer türleri ile Akdeniz havzasındaki antik mermer ocak ve eserlerinin konumu ……. 132
6.4 : Tapınak-A, Hierapolis, Domuzderesi, Afrodisias mermer örnekleri ile Akdeniz havzasındaki bazı antik mermer ocaklarındaki örneklerin maksimum tane boyutlarının karşılaştırılması……. 133

ÖZET

LAODİKEİA (DENİZLİ-GB TÜRKİYE) ANTİK KENTİ TAPINAK-A (SEBASTEİON) YAPISINDA KULLANILAN MERMERLERİN MİNERALOJİK PETROGRAFİK JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ VE KAYNAK ALANLARININ BELİRLENMESİ

Anadolu, tarih öncesi çağlardan beri pek çok medeniyete ev sahipliği yapmış ve kültürel bir zenginlik bırakmıştır. Bu kültür mirasının önemli yerlerinden biri de Lykos vadisinde kurulmuş olan Laodikeia antik kentidir. M.S 7 yy. kadar kullanılmış olan bu kent, Hıristiyanlığın en önemli ve kutsal merkezlerinden olup, Anadolu'da yer alan Yedi Kiliseden birine sahiptir. Ayrıca şehirde pek çok mermer ve travertenden yapılmış yapılar bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında kentin en önemli yapılarından biri olan Tapınak-A (Sebasteion) yapısı incelenmiştir. Bu yapıda kullanılmış olan mermerler üzerinde petrografik, mineralojik ve jeokimyasal incelemeler, duraylı izotop oranları ve konfakal raman spektroskopisi teknikleri kullanılarak tanımlama yapılmaya çalışılmıştır. Tapınak-A yapısında renk ve dokusal özelliklerine göre beyaz renkli lila-mor damarlı, beyaz renkli, beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli olmak üzere dört çeşit mermer kullanıldığı tespit edilmiştir. Mermerlerin mikroskop ve XRD incelemelerinde başlıca kalsit + dolomit ± diyopsit (lila-mor damarlı); kalsit (beyaz renkli); kalsit + dolomit ± kuvars ± muskovit ± opak mineral (gri damarlı) ve kalsit ± kuvars ± piroksen ± zirkon (gri renkli) mineralojik bileşimi belirlenmiştir. Duraylı izotop oranları incelendiğinde ise $\delta^{13}C$ değerleri için -1,47‰ ile 2.46‰ arasında ve $\delta^{18}O$ değerleri için -0,04‰ ile -9,16‰ arasında değiştiği bulunmuştur. Ayrıca Laodikeia antik kenti Tapınak-A yapısı mermerleri Hierapolis, Domuzderesi ve Afrodisias antik ocaklarındaki mermer örnekleri ile karşılaştırılarak kaynak kökenine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında Tapınak-A yapısında kullanılan mermerlerinin, Hierapolis ve Domuzderesi antik ocaklarındaki mermer örnekleri ile büyük oranda benzeştiği görülmüştür. Sözü edilen antik ocakların Denizli Grabenin kuzey (Hierapolis) ve güney (Domuzderesi) kenarlarında olduğu ve bu kesimlerdeki kaya birimlerinin birbirine benzer oldukları düşünüldüğünde tam olarak kaynak alanı belirtmenin doğru olmayacağı düşünülmektedir. Ayrıca Laodikeia şehrinin tarihte birkaç defa büyük depremlerle yıkıldığı ve şehrin yeniden inşa edildiği düşünülürse her iki ocak bölgesinden de farklı zamanlarda malzeme alınmış olabileceği bir gerçektir.

Anahtar kelimeler: Laodikeia, Tapınak-A, Petrografi, Mermer, XRD, Duraylı İzotop, Antik Ocak.

SUMMARY

MINERALOGIC PETROGRAPHIC GEOCHEMICAL CHARACTERIZATIONS OF THE MARBLES IN THE TEMPLE-A FROM THE LAODIKEIA ANTIQUE CITY (DENİZLİ - SW TURKEY) AND MARBLE PROVENANCE INVESTIGATION

Anatolia has been home to many civilitions since prehistoric times and has given up cultural heritage. One of important parts of this cultural heritage is also Laodikeia ancient city which established. This city has been used up until seventh century A.D. Christianity is the most important and sacred centre. Besides the city has one of the seven churches in Anatolia. Additionally, there are most of building constructed marble and travertine.

This paper investigates Temple-A structure which been most important in city. The marbles which used this structure were study to identify using petrographic, mineralogical and geochemical investigation, stable isotopic ratio and konfokal raman spectroscopic technical. According to colour and texture chacracteristic, Temple-A structured were determined lilac-violet veins, white, gray veins and gray. Based on microscopic and XRD study, marbles consist mainly of calcite + dolomite ± diopside (lilac-violet veined); calcite (white color); calcite + dolomite ± quartz ± muscovite ± opaque minerals (gray veined) and calcite ± quartz ± pyroxene ± zircon (gray color). Additionally, for the Temple-A marbles, stable isotope ratio has ranges between -1,47‰ to 2.46‰ for values of δ13C, whereas δ18O ranges from -0,04‰ to -9,16‰. Besides marbles of Temple-A structure from Laodikeia ancient city were compared with Hierapolis, Domuzderesi and Aphrodisias antique quarry and marble provenance were investigation. The results were compared with samples of the marble quarries of ancient Hierapolis and Domuzderesi was greatly resembled. Mentioned in the ancient quarries in Denizli graben north (Hierapolis) and southern (Domuzderesi) that the edges of the rock units and sectors is considered to be similar to each other does not have any right to specify exactly the resource area. Also the city of Laodicea was destroyed by earthquakes in history, and the city was rebuilt several times, given that a large hearth area of both materials could be taken at different times in fact.

Key words: Laodikeia, Temple-A, Petrography, Marble, XRD, Stable Isotopic, Antique Quarry.

1. GİRİŞ

1.1 Araştırmanın Amacı

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim dalı Mineraloji-Petrografi programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmanın amacı; Denizli ilinin 6 km kuzeyinde M.Ö.3.yy'da kurulmuş Laodikeia antik kentinde yer alan Tapınak-A yapısındaki mermerlerin mineralojik, petrografik, jeokimyasal ve izotop özelliklerini belirlemek, bölgedeki antik mermer ocaklarından alınan örneklerle karşılaştırmalarının yapılması ve olası kaynak alanlarının belirlenmesidir.

1.2 Uygulanan Yöntemler

Çalışma kapsamında Tapınak-A yapısının kazı çalışmaları sırasında bulunan mermer parçalarından ve daha önce belirlenen Hierapolis, Domuzderesi, Afrodisias antik mermer ocaklarından farklı renk ve doku özelliği gösteren mermer örnekleri alınmış (şekil 1.1), bu örneklerden petrografik incelemeler için ince kesitler hazırlanmıştır. Hazırlanan 124 adet ince kesit üzerinde mineralojik bileşim ve dokusal tanımlama yapılmıştır. Bu incelemeler Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Optik Mineraloji Laboratuvarında, "Leica DM750P" marka polarize mikroskop kullanılarak tamamlanmıştır.

İncelenen mermer örneklerinde mikroskop çalışmaları sırasında ayrımı yapılamayan karbonat minerallerini (kalsit\dolomit\aragonit vb.) ve tanımlanamayan daha küçük boyutlu bileşenleri belirleyebilmek için X-Işınları Difraktometre (XRD) analizi yapılmıştır. XRD analizler için, farklı renk ve doku özelliği gösteren 51 adet mermer örneği, halkalı değirmende 150-200 mesh boyutuna kadar öğütülerek toz haline

getirilmiştir. Toz halindeki mermer örneklerinin XRD analizleri Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM) Laboratuvarında "Inel Equinox 1000" marka cihazla kobalt katotlu tüp kullanılarak yapılmıştır.

Mikroskop ve XRD çalışmaları ile ayrımı yapılamayan karbonat minerallerinin türlerinin belirlenmesi amacıyla farklı renk ve doku özelliği gösteren 9 adet mermer ince kesiti üzerinde Konfokal Raman Spektrometre (Confocal Raman Spectrometer - CRS) çalışmaları yürütülmüştür. CRS çalışmaları Ankara Üniversitesi YEBİM Laboratuvarında, yüksek çözünürlüklü, analitik konfokal raman mikroskoplu, "HORIBA Jobin-Yvon Labram HR" cihazı kullanılarak yapılmıştır.

Farklı renk ve doku özelliği gösteren mermer örneklerinin jeokimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla X-ışınları Floresans (XRF) analizi yapılmıştır. XRF analizi için belirlenen lokasyonlardan alınan 99 adet mermer örnekleri halkalı değirmende 150-200 mesh boyutuna kadar öğütülmüştür. Daha sonra her bir kayaç tozundan 3.9 gr alınarak, 0.9 gr bağlayıcı wax ile homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Karışım halindeki örnek tozu 15-20 N/m basınç altında, 32 mm çapında bir tablet şeklinde sıkıştırılmış ve analize hazır hale getirilmiştir. XRF analizleri Ankara Üniversitesi YEBİM Laboratuvarında "Spectro XLAB 2000 PEDXRF" (Polarized Energy Dispersive XRF) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Analizler USGS'in sedimanter kayaçlar (kireçtaşı) için oluşturduğu standartlar kullanılarak kalibre edilmiştir.

C ve O izotop oranlarının analizi antik dönem yerleşim alanlarında kullanılan mermer türü yapıtaşlarının köken ve kaynak alanlarının belirlenmesinde yaygın ve etkili bir şekilde kullanılan metotlardan biridir. Bu amaçla belirlenen antik ocaklar ve Tapınak-A yapısından alınan farklı renk ve doku özelliğine sahip 94 adet mermer örneği üzerinde C ve O izotop analizleri yapılmıştır. Mermer örneklerinin C ve O izotop oranları İngiltere'deki Iso-Analytical Limited laboratuarında Sürekli Akış-İzotop Oranı Kütle Spektroskopisi (CF-IRMS) ile ölçülmüştür. Analiz sonuçları IA-R022 (Iso-Analitik çalışma standardı kalsiyum karbonat, $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ = ‰ - 28.63 ve $\delta^{18}O_{V\text{-}PDB}$ = ‰ -22.69), NBS-18 (karbonatit, $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ = ‰ –5.01 ve $\delta^{18}O_{V\text{-}PDB}$ = ‰ -23.2) ve NBS-19 (kireçtaşı, $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ = ‰ +1.95 ve $\delta^{18}O_{V\text{-}PDB}$ = ‰ -2.2) standartları kullanılarak kalibre edilmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan mermer örneklerinin sayısı ve uygulanan analiz yöntemlerinin çalışma sahalarına göre dağılımı tablo 1.1'de verilmiştir.

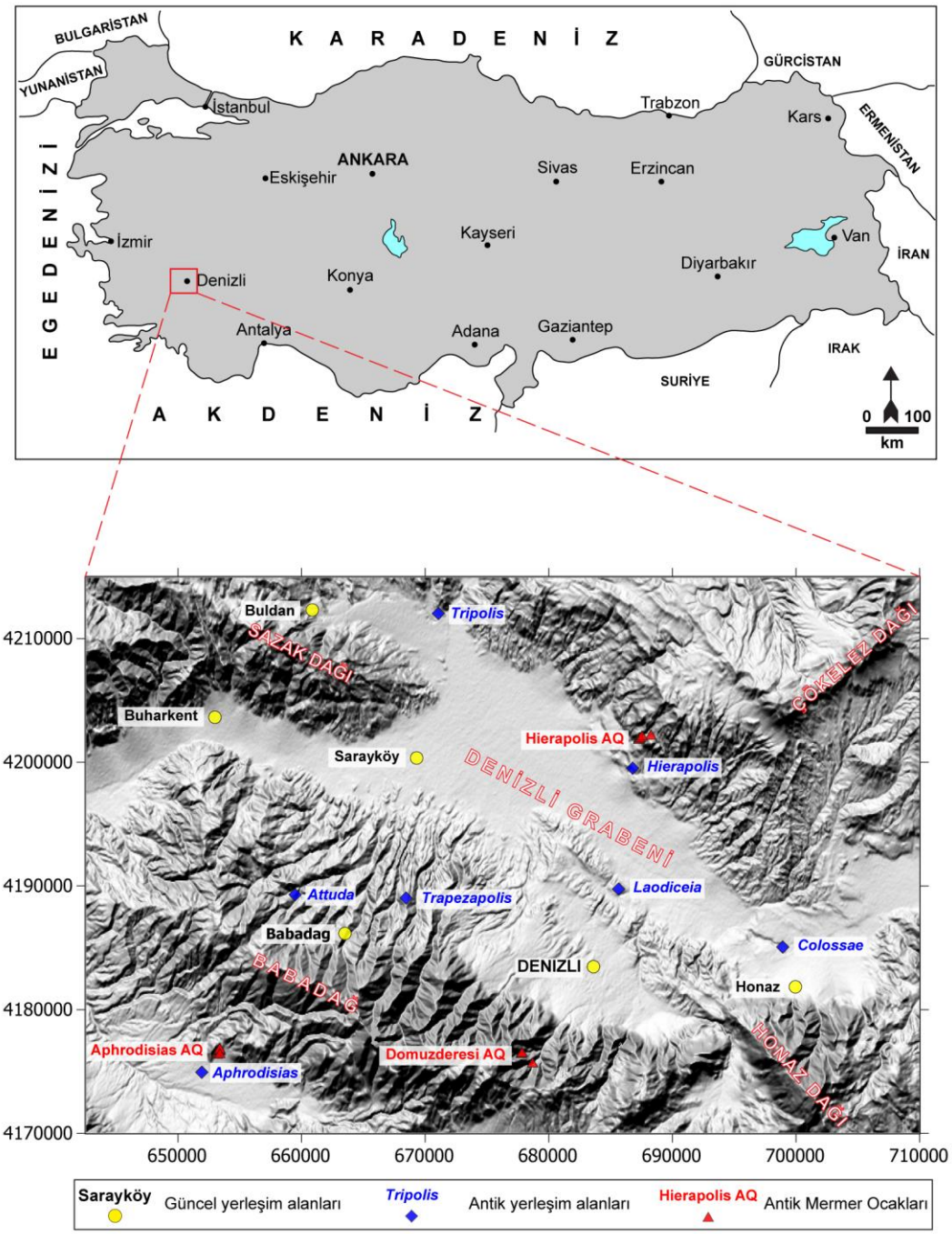
Tablo 1.1: Çalışma alanlarından toplanan ve analiz yapılan kayaç türleri ile sayıları

Örnek Yerleri	**UYGULANAN ANALİZ YÖNTEMLERİ**				
	Mineralojik-Petrografik İnceleme	**XRD Analizi**	**CRS Çalışması**	**XRF Analizi**	**C-O İzotop Analizi**
Laodikeia Tapınak-A	40	24	9	40	40
Hierapolis Antik Ocağı	13	9	-	29	21
Domuzderesi Antik Ocağı	44	9	-	15	18
Afrodisias Antik Ocağı	27	9	-	15	15
Toplam	124	51	9	99	94

1.3 İnceleme Alanlarının Konumu

Laodikeia, Hierapolis, Domuzderesi ve Afrodisias'ı kapsayan inceleme alanları 1/25000 ölçekli Denizli M22-a4 (Laodikeia antik kenti), M22-a2 (Hierapolis antik ocağı), M22-d1 (Domuzderesi antik ocağı) ve M21-d2 (Afrodisias antik ocağı) paftalarında yer almaktadır. Bu çalışmada belirtilen lokasyonlarda detaylı jeolojik harita alımı çalışmaları yapılmamış, örnek alımı yapılmıştır. Laodikeia antik kentinin bulunduğu Lykos (Çürüksu) ya da Denizli Grabeni konum olarak Batı Anadolu'da, İç Ege Bölgesi'nde yer alır. Denizli Grabeni; güneyde Babadağ (Salbakos 2308 m Gökbel zirvesi) silsilesi, kuzeyde Çökelez Dağı (1805 m), güneydoğuda Honaz (Kadmos) Dağı (2571 m Kılıçtepe Zirvesi), batıda ise Buldan Sazak Dağı (1143 m) ile çevrelenmiştir (Şekil 1.1). Grabenin kuzeybatısından geçen Büyük Menderes (Maiandros) Nehri, Afyon' nun Dinar (Apameia) ilçesinden doğar ve batı'da Söke Grabenini geçerek Ege Denizi'ne dökülür. Küçük, fakat verimli toprakların bulunduğu grabene adını veren, Lykos (Çürüksu) Nehri; Honaz (Kadmos) Dağı eteklerinden doğarak Lykos (Çürüksu) Grabeninin ortasından geçip, Sarayköy yakınında Büyük Menderes Nehrine karışmaktadır. Kentin doğusundan başlayarak, kuzey ve kuzeybatısına doğru uzanan bu nehir, Büyük Menderese katılmadan önce

daha küçük kollar olan Asopos (Gümüşçay-Goncalı Deresi) ve Kapros (Başlıçay) ile birleşir.



Şekil 1.1: İnceleme alanlarını gösteren yerbulduru haritası

2. BÖLGESEL JEOLOJİ

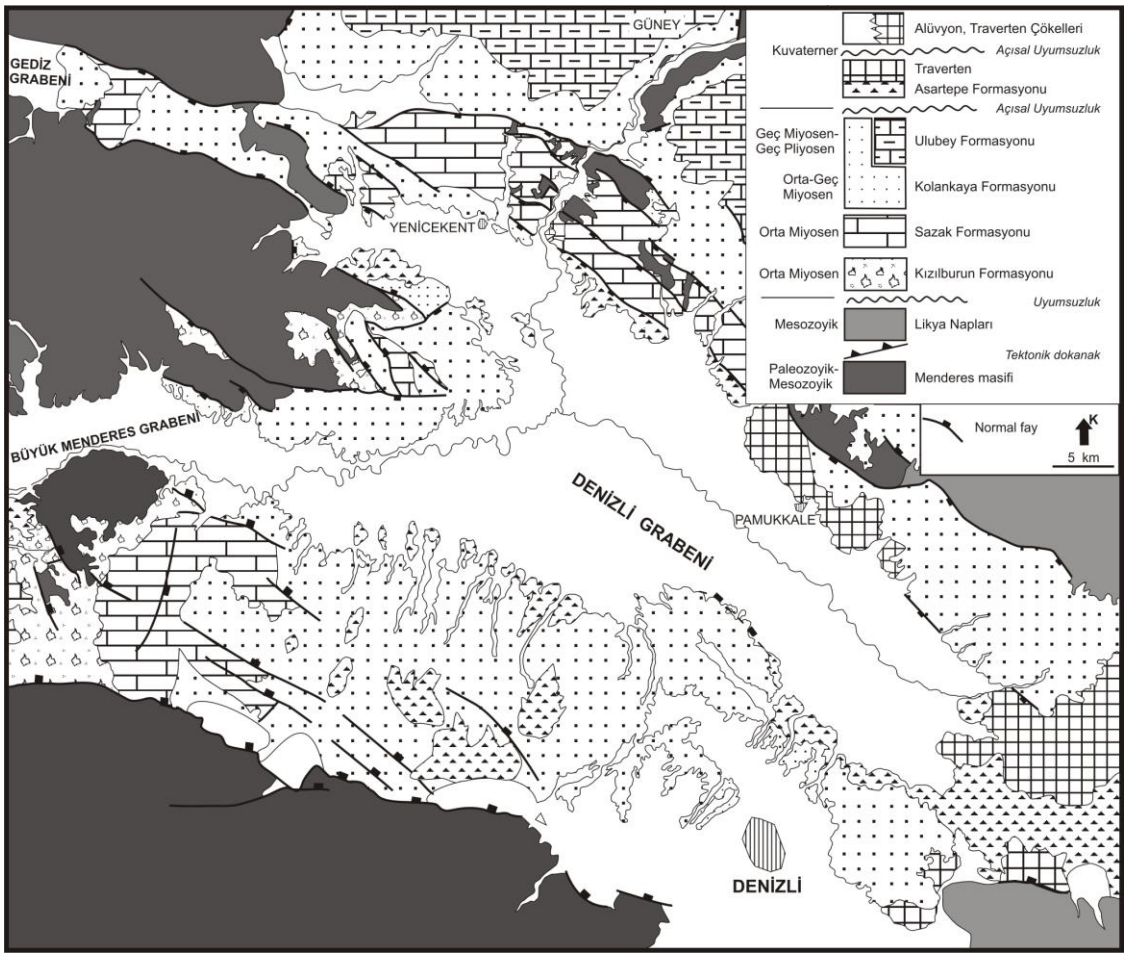
Türkiye Alp-Himalaya kıvrım kuşağı içerisinde yeralmaktadır. Mesozoyik-Paleojen dönemleri boyunca K-G yönlü sıkışmanın etkili olduğu, karmaşık tektonik bir evrime sahiptir (Şengör ve Yılmaz 1983). Paleotektonik dönem olarak da adlandırılan bu sıkışma fazı erken Miyosen döneminde sona ermiş, değişik kayaç birlikteliklerinden oluşan günümüz coğrafyasını oluşturmuştur.

Denizli ilinin 6 km kuzeyinde bulunan Laodikeia antik kenti ve çevresindeki antik mermer ocakları (Afrodisias antik mermer ocağı dışında) Denizli horst-graben sistemi içerisinde bulunmaktadır. Denizli horst-graben sistemi Denizli ilinin batı ve kuzeybatısında yer alan grabenlerin (Gediz ve Büyük Menderes) kesişim noktasında yer almaktadır. Westaway (1990, 1993) tarafından Denizli Grabeni olarak tanımlanan bu çöküntü alanı KB-GD uzanımlı, 7-28 km genişliğinde ve 62 km uzunluğundadır.

Denizli Grabeni ve çevresinde görülen jeolojik birimler yaşlıdan gence doğru; Paleozoyik - Mesozoyik yaşlı metamorfitler (Menderes Masifi), Mesozoyik yaşlı Likya napları, Miyosen - Pliyosen yaşlı neojen çökelleri (karasal ve/veya gölsel karakterli konglomera, kumtaşı, kiltaşı, kireçtaşı, marn ve silttaşı ardalanmaları) ve Kuvarterner yaşlı çökellerdir (alüvyon, yamaç molozu, traverten) (Şekil 2.1) (Sun, 1990; Özkul ve diğ., 2002, 2013; Erten, 2013).

Menderes Masifi ve Likya napları bölgenin temel kayaçlarını oluştururlar. Menderes Masifinde iki stratigrafik düzey ayırt edilmektedir. Bunlar; ileri derecede metamorfizmaya uğramış gözlü gnays, migmatit, amfibolit ve eklojit kayaçlarından oluşan çekirdek seviyesi ve bu seviyeyi örten kuvarsit, mikaşist, fillat ve bu tezin çalışma konusu olan mermerler ana birimlerinden oluşur (Oberhanslı ve diğ., 1997; Yılmaz ve diğ., 1998; Koralay ve diğ., 2011). Menderes Masifinin çekirdek seviyesinin Pan Afrikan temeline ait yaşlı bir kristalen kütle olduğu ve yaşının 0,8-2

milyar yıl arasında değiştiği farklı araştırmacılar tarafından belirtilmektedir (Şengör ve diğ., 1984; Satır ve Friedrichsen, 1986; Candan ve diğ., 2011). Masifi oluşturan örtü kayalarının tanım ve ayırımından kaynaklanan farklılıklar nedeniyle yaşları üzerinde bir fikir birlikteliği bulunmamaktadır. Bazı araştırmacılar örtü kayalarında Kambriyen'den Eosen'e kadar olan bir istifin varlığını kabul ederken, diğer bazı araştırmacılar ise Üst Karbonifer'den Üst Kretase - Eosen'e kadar olan bir istiften söz etmektedir (Yılmaz ve diğ., 1998).



Şekil 2.1: Denizli Grabeninin sadeleştirilmiş jeoloji haritası (Sun, 1990; Özkul ve diğ., 2002, 2013; Erten, 2013)

Likya napları Triyas-Üst Kretase yaşlı ofiyolit ve sedimanter/metasedimanter birimlerden oluşmaktadır. Napların bir bölümü kalın karbonat ve kırıntılı istiflerle temsil edilirken, diğer bölümünü ofiyolit kayaçlar oluşturmaktadır. Ayrıca Likya naplarını oluşturan kaya birimleri düşük dereceli metamorfizma etkileri göstermektedir (Gökkaya, 2008). Denizli Grabeni içerisinde grabenin

güneydoğusunda yaygın olarak görülen Likya Napları şeyl, kumtaşı, konglomera, kuvarsit, kireçtaşı, dolomit ve serpantinleşmiş peridotit türü kaya birimleri tarafından temsil edilmektedir (Şekil 2.1) (Topal, 2012).

Grabeni dolduran Neojen yaşlı çökeller Şimşek (1984) ve Ercan ve diğ. (1978) tarafından tanımlanmış olup, yaşlıdan gence doğru Kızılburun, Sazak, Kolankaya ve Ulubey formasyonlarından oluşmaktadır. Orta Miyosen yaşlı Kızılburun formasyonu yaklaşık 450 m kalınlığında kaba ve ince taneli konglomera, kumtaşı ve çamurtaşında oluşmaktadır. Kızılburun formasyonu üzerine uyumlu olarak Orta Miyosen yaşlı Sazak formasyonu gelmektedir. Sazak formasyonu 200 m kalınlığa sahip olup, kireçtaşı, gri renkli marn, laminalı silttaşı-çamurtaşı, killi kireçtaşı, çörtlü kireçtaşı, selenitik jips, jipsarenit, jipsli halit, jipsli çamurtaşı litolojilerinden oluşmaktadır. Orta Geç Miyosen yaşlı Kolankaya formasyonu marn, çamurtaşı (kil-silt ardalanması) ve kumtaşlarından oluşmakta olup, 200-500 m arasında kalınlığa sahiptir. Denizli grabeninin kuzey kanadındaki yüksek alanlarda görülen Ulubey formasyonu 200 m kalınlığında olup, gölsel kireçtaşlarından oluşmaktadır (Ercan ve diğ., 1978; Alçiçek, 2007; Erten, 2013).

Bölgede Kuvaterner yaşlı çökeller Asartepe formasyonu ve traverten birimlerinden oluşur. Asartape formasyonu havzanın güneydoğusunda görülmekte olup, 200 m kalınlığındadır. Formasyon genellikle kırmızımsı turuncu ve/veya beyaz renkli, orta-kalın tabakalanmalı, gevşek kireç-kil çimentolu, farklı kökenli, yarı yuvarlanmış konglomera-kumtaşı ardalanması ve yer yer marnlı, kireçli seviyelerden oluşmaktadır (Ercan ve diğ., 1978). Travertenler ise Kocabaş ve Belevi çevresinde, 450-1000 m yükseklikler arasında yüzlek verirler. Travertenler yer yer kırmızı-yeşil renkli paleosol, çakıltaşları ve kumtaşı ara düzeyleri ile birlikte bulunurlar (Özkul ve diğ., 2002, 2013).

2.1 Önceki Çalışmalar

Laodikeia antik kenti 18. yy'dan beri gezginler ve arkeologlar tarafından bilinmesine rağmen ilk kazı çalışmaları 1961-1963 yılları arasında Kanada Quebec Laval Üniversitesi'nden Prof. Jean Des Gagnier yönetiminde başlamıştır (Kuzu, 2008). Laodikeia antik kenti ve çevresindeki bilimsel çalışmalar çoğunlukla kazı çalışmaları

ve bu çalışmalarda elde edilen arkeolojik buluntular üzerinedir. Bu tez çalışması ile ilk defa Tapınak-A yapısında kullanılan mermerlerin mineralojik-petrografik, jeokimyasal ve izotop özellikleri incelenmiş, olası kaynak alanlarının belirlenmesi amacıyla antik mermer ocaklarından alınan örnekler ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Laodikeia antik kenti için ilk sayılabilecek böyle bir çalışma Ege bölgesinde ve eski Roma uygarlığı coğrafyasında yaygın olarak yapılmış/yapılmaktadır. Aşağıda bu çalışmalardan bazıları özet olarak verilmiştir.

Tapınak-A olarak adlandırılan yapıda kazı çalışmalarına 2004 yılında başlanmıştır. Tapınak-A, Suriye Caddesi'nin kuzey kenarında yer alır. Tapınak-A kazısının amacı; hippodomik sistemde düzenlenen kent içinde caddenin iki yanında sıralanan Merkezi Agora, Septimius Severus Çeşmesi (A Nymphaeum) ve bunun doğusunda yer alan bu yapıda da kazı çalışmalarını yapmak ve alan içinde plan bakımından bir bütünlük oluşturmasını sağlamaktır. Ayrıca değişik yayınlarda Sebasteion (İmparatorluk kült alanı) olarak adlandırılan bu tapınağın imparatorluk için mi, yoksa tanrı/tanrıçalar için mi yapılmış olduğunu saptamak ve yapılış tarihi ile sonraki kullanım aşamalarını tespit etmektir. Tapınak-A buluntuları, yapının hem tanrılar, hem de imparatorluk kültü için yapıldığını göstermektedir (www.laodikeia.pau.edu.tr).

Şu ana kadar bilimsel ve edebi yazında Laodikeia ve Tapınak-A yapısı ile ilgili en ayrıntılı bilgiye Pamukkale Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Arkeoloji Bölümünden Prof. Dr. Celal ŞİMŞEK'in Laodikeia-Laodikeia ad Lycum adlı kitabında rastlanılmaktadır (Şimşek, 2007). Ancak bu eserde Tapınak-A yapısında kullanılan mermerlerin jeolojik, mineralojik-petrografik jeokimyasal ve izotop özelliklerine yönelik bilgi yer almamaktadır

Herz (1987), Araştırmacı antik dönem Yunan ve Roma beyaz mermerlerinin C ve O izotopları için veri bankası oluşturmaya çalışmıştır. Bu veri tabanını kullanarak kaynak alanı bilinmeyen mermer örneklerini bilinen antik ocaklar ile karşılaştırmış ve birçok antik eserin olası kaynak alanını belirleyebilmiştir. Akdeniz havzasındaki iyi bilinen birçok antik mermer ocağının işletilme dönemleri ile önemli antik eserlerin (heykel, lahit vb.) üretim zamanlarının biliniyor olması oluşturulan bu veri bankasının kullanılabilirliği ve güvenilirliğini önemli ölçüde arttırmıştır. Araştırmacı Yunan ve Roma mermerleri için karbon ve oksijen izotopları kullanarak oluşturduğu

veri bankası sayesinde kaynak alanı bilinmeyen birçok antik eserin olası kaynak alanını belirlenebilir duruma getirmiştir.

Matyhews (1997), Antik mermerlerin kaynak alanlarının belirlenmesine yönelik olarak sekiz farklı ocak bölgesinden 183 mermer örneğinin Nötron Aktivasyon analizlerini gerçekleştirmiştir. Bununla birlikte İngiliz Müzesi (Britihs Museum) antik Yunan ve Roma dönemi eserlerinden alınan mermer örnekleri üzerinde de benzer çalışmayı gerçekleştirmiştir. Müze örneklerinin tahribatına izin verilmediği için tek bir eserin farklı görülen noktalarından örneklemeler yapılarak analizler gerçekleştirmiştir. Araştırmacı kullandığı metot sayesinde geniş bir blok parçasından yaklaşık 200 mg gibi az bir örnekle çok miktarda örnek alarak tüm numune özelliklerine sahip bir veri tabanı oluşturmuştur. Mermer kaynağına yönelik kullanılan çoklu metotları (petrografik, jeokimyasal ve duraylı izotop analizleri) birleştirerek geçerli bir tanımlama gerçekleştirmiştir.

Cramer ve diğ. (1998), Berlin'deki Pergamon Müzesinde Great Altar anıtının mermer örnekleri üzerinde bir dizi jeolojik ve arkeometrik inceleme gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar Pergamon Altar mermerlerinin izotop verilerini ilk kez bu çalışmada yayınlamışlar, bu verilerden hareketle mermerlerin kaynak alanına yönelik sorulara cevap bulmaya çalışmışlardır. Ayrıca mineralojik, petrografik (tali mineraller, tane boyu dağılımı) ve jeokimyasal (nadir toprak elementleri) incelemelerle mermerlerin karakteristik özelliklerini ortaya çıkarmışlardır. Tüm çalışmalar sonucu anıtın yapımında iki farklı mermer kullanıldığını ve bunların kaynak alanlarının Ege adaları ve Marmara bölgesi olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Gorgoni ve diğ. (1998), Akdeniz havzası (Aphrodisias, Carrara, Docimium, Naxos, Paros, Penteli, Proconnesos ve Thasos gibi) klasik dönem mermerleri için C-O duraylı izotop çalışmaları ile minero-petrografik özelliklerine yönelik çalışmalar yapmışlar ve mermerlere yönelik mevcut veri bankasını güncellemişlerdir. Ek olarak kalsit ve/veya dolomit kristallerinin maksimum tane boyutları (Maximum Grain Size - MGS) ile C ve O duraylı izotop değerlerini belirlemişler, mermerlerin dokusal tanımlamalarını da vermişlerdir. MGS ölçümlerinin mermer kaynak alanlarının belirlenmesi için istatistiksel olarak çok daha önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Ocak örnekleri ve antik eserler için oksijen izotop verilerini geniş bir biçimde raporlamışlar ve eliptik diyagramlara yerleştirmişlerdir. Bu diyagramlarda birbirleriyle kesişen mermer türlerinin ayrımına netlik kazandırmak için ikili ayırışım fonksiyonu diyagramları oluşturmuşlardır.

Borg ve diğ. (2000), Didim'deki (Batı Anadolu) Apollo tapınağında kullanılan mermerlerin kökenine yönelik çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Bunun için hem ocaklardan (58 örnek) hem de tapınaktan (47 örnek) örnekler alarak izotop ve petrografik analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu verileri daha önceki çalışmalarla karşılaştırarak mermerlerin bölgeden mi? yoksa başka bölgelerden mi? taşındığını araştırmışlardır. Sonuç olarak, Didim'deki Apollo tapınağının inşasında kullanılan mermerlerin Bafa Gölü civarından geldiğini belirlemişlerdir. Bununla beraber Apollo tapınağının yapımında ve çeşitli dönemlerdeki onarımlarında Thasos (Toşöz) ve Marmara'nın Proconnesian mermerlerinin de kullanıldığını tespit etmişlerdir.

Hancock ve diğ. (2000), Antik Yunan, Roma ve Bizans döneminde Hierapolis antik kentinin yapımında kullanılan traverten ocaklarının büyük bir kısmının Pamukkale fayının önünde ve antik kentin aşağısında bulunan düzlük alanlarda ve/veya fay dikliklerinde bulunuduğunu ifade etmişlerdir. Traverten depolanmalarının aktif faylar ve bunlara bağlı açılma çatlaklarından yüzeye çıkan karbonatça ve gazca zengin sıcak kaynak suları ile ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir. Çoğunlukla bantlı traverten oluşumlarının görüldüğü açılma çatlaklarında Roma ve Bizans dönemlerinde lahit, blok, sütun üretimi yapıldığı, daha ince taneli olanlarının süstaşı olarak kullanıldığını ifade etmişlerdir.

Polikreti ve Maniatis (2002), Doğu Akdeniz havzasında [Penteli, Naxos (Apollon ve Melanes), Hymettus ve Proconnessus] antik dönem ocaklarındaki beyaz mermer türlerini Elektron Paramanyetik Rezonans (EPR) spektroskopi yöntemiyle incelemişler, bulgularını önceki araştırmacıların on beş yıllık çalışmaları ile birleştirerek geniş bir veri tabanı oluşturmuşlardır. EPR çalışmaları sonucu belirlemiş oldukları 10 farklı parametreyi seçerek ocak ayırımlarına gitmişlerdir. EPR ölçümleri yanında MGS ölçümlerinin de ocak ayrımında yararlı olduğunu tespit etmişlerdir. MGS ölçüm sonuçlarına göre Hymettus ve Penteli ile Naxos-Appollon, Naxos-Melanes ve Proconnessus ocaklarının farklı olduğunu belirlemişlerdir. EPR

ölçümlerinin değerlendirmesinde önemli bir ölçüt olan Mn^{+2} sonuçlarına göre sadece Penteli ocağının diğer alanlardan ayrıldığını, genişlik parametresine göre ise herhangi bir ayrıma gidilemediğini ifade etmişlerdir. Analizlerin tek olarak değerlendirilmesinin yetersiz olduğunu gördükleri için Mn^{+2} ve MGS değerlerinin logaritmik dönüşümlerini birlikte kullanmışlardır. Bu değerlendirmeye göre Penteli mermerlerinin belirgin olarak ayrıldığını, Naxos-A ve Naxos-M; Paros ve Hymettus; Paros-litik, Paros-Lakkoi ve Proconnessus mermer örneklerinin birbirleriyle örtüştüğünü tespit etmişlerdir. Bu alanları da birbirinden ayırmak için MGS/Genişlik, log(MGS), log(Mn^{+2}) ve $\log^2$(g=1.9998) (g=1.9998, axial CO_2^- radikalleri) ölçütlerini birlikte kullanmış ve tüm bölgeleri başarılı bir şekilde ayırmışlardır.

Özkul ve diğ. (2002), Denizli Grabeni genelinde güncel ve eski travertenlerde arazi ve petrografik özelliklerine göre farklı litofasiyesler tanımlamışlar, bu litofasiyeslerin çökeldiği depolanma ortamlarını ve izotop değişimlerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda Kuvarterner yaşlı traverten oluşumlarında dokuz litofasiyes tanımlamışlardır. Bu litofasiyeslerin ^{13}C izotop değerlerinin ‰ 0,35 ile 6,70 (V-PDB) arasında, ^{18}O izotop değerlerinin ‰ -6,47 ile -15,10 (V-PDB) arasında geniş bir dağılıma sahip olduğunu, litofasiyeslerin yapılarına ve ortamlarına göre izotopik olarak bir gruplaşma gösterdiğini ortaya çıkarmışlardır.

Dirik ve diğ. (2003), Knidos'un içinde yer aldığı Datça Grabeni'nin detaylı neotektoniğini ve jeomorfolojisini incelemişlerdir. Knidos antik kentinde halen devam etmekte olan arkeolojik kazılar sonucu ortaya çıkarılan terasları oluşturan jeolojik ve jeomorfolojik olayları araştırmışlardır. Bununla birlikte kazılar sırasında bulunan seramik parçalarının mineroloji-petrografik ve jeokimyasal özellikleri ile bunların nerelerden sağladıklarını belirlemeye yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bu incelemeler sonuncunda Datça Yarımadası ile civarının oldukça önemli ve yıkıcı depremler ile volkanik faaliyetlere maruz kaldığını, Antik Knidos'ta gözlenen deformasyon yapıları, Körmen civarındaki genç faylar ve aletsel dönemdeki deprem odak çözümlemelerine dayanarak bölgede D-B doğrultulu fayların aktif olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar seramik ve toprak örnekleri arasındaki mineralojik benzerliğe dikkat çekerek, kaynak alanı olarak Datça Ovasını göstermişlerdir. Ancak seramik yapımında kullanılan hammaddenin, tek bir kaynaktan alınmadığını, farklı kil yataklarından alınan malzemenin karıştırılarak kullanıldığı sonucuna varmışlardır.

Lazzarini ve Antonelli (2003), Yunanistan'ın Tinos adasındaki antik ocaklarda yer alan mermerlerin petrografik, X-Ray Difraksiyon (XRD) ve izotop analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri analiz sonuçlarının Akdeniz ve Ege bölgesindeki antik mermer ocakları ile karşılaştırmasını yapmışlar, mermerlerin kaynak kökenini belirlemeye çalışmışlardır. Petrografik ve izotop analizleri sonucunda Tinos mermerlerinin saf olmayan denizel kireçtaşlarının düşük sıcaklık-yüksek basınç bölgesel metamorfizma süreçleri sonucunda (yeşilşist fasiyesi) oluştuklarını belirlemişlerdir. Bu verileri Dokimeion (İscehisar-Afyon/Türkiye); Syros, Marathi, Paros (Ege Denizi-Yunan Adaları); Penteli Dağı (Atina-Yunanistan) ve Luni (Carrara-İtalya) bölgesindeki antik mermer ocaklarıyla karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda Tinos mermerlerinin Syros mermerleri ile oldukça benzer olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca petrografik olarak Tinos mermerlerinin Docimium, Paros ve Luni'deki mermerlerden farklı, Pentelic mermerleriyle benzer olduğunu belirlemişlerdir. Ancak ortalama tane boyu açısından Pentelic mermerlerin daha iri taneli olduğunu tespit etmişlerdir.

Capedri ve Venturelli (2004), Modena'daki (kuzeydoğu İtalya) Museo Lapidario ve Reggio Emilia (Roma Regium Lepidi) müzelerinde bulunan otuz sekiz Roma ve orta çağ arkeolojik eserinde petrografik, mineralojik, C-O duraylı izotop analizleri ve tali mineraller üzerinde taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy-SEM) incelemeleri yapmışlardır. Bu analizlerden elde ettikleri verileri Akdeniz havzasında bulunan Carrara, Penteli, Paros, Naxos, Thasos, Marmara, Aydın ve Afyon'daki antik mermer ocaklarından elde edilen verilerle karşılaştırmışlardır. İncelenen arkeolojik mermer örneklerinde gözlenen tali minerallerin plajiyoklaz ve beyaz mika (filogopit, muskovit, margarit, paragonit) olduğunu belirlemişlerdir. Arkeolojik eserlerin tek bir kaynak alanından geldiğini bulmak için tali mineral incelemelerini, duraylı izotop analizlerini ve olası dokulardaki MGS incelemelerini birleştirerek yoruma gitmişlerdir. Akdeniz havzasındaki mermer örneklerinde tespit edemedikleri tali minerallerin arkeolojik eserlerde nadiren bulunduğunu gözlemlemişler ve bu yüzden eser örneklerinin olası kaynak alanlarla ilgisi olup olmadığını tam olarak belirleyememişlerdir. Sonuç olarak sadece tali mineral bileşimleri kullanılarak kaynak alanının belirlenmesinin zor oluğunu ifade etmişlerdir.

Melfos (2004), Yunanistan'ın Larisa şehrindeki üç antik ocakta bulunan mermerlerin jeolojik, mineralojik-petrografik ve izotopik özelliklerini ortaya çıkarmıştır. İncelenen antik ocakların Kastri köyünde (Aghia alanı), Kalochori'de (Skykourio alanı) ve Gonnoi'de (Tempi alanı), Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı, baskın olarak metamorfik kayaçlardan oluşan Pelagonian zonunda yer aldığını belirlemiştir. Ayrıca araştırmacı yaptığı incelemelerde antik dönemde ocak işletmesinde uygulanmış teknoloji ve kullanılan materyallerle ilgili önemli bilgiler de elde etmiştir. Araştırma sonuçlarına göre Kastri mermerlerinin $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ ortalama değerlerinin ‰+2,80 ve 4,51, Kalochiri mermerlerinin ise ‰+0,87 ve -8,33 olduğunu raporlamıştır. Gonnoi'de izotop sonuçlarının heterojen dağılım gösterdiğini, Gonnoi-1A için $\delta^{13}C$ ‰+0,87 ve $\delta^{18}O$ ‰-4,65, Gonnoi-1B için $\delta^{13}C$ ‰+1,89 ve $\delta^{18}O$ ‰-7,97, Gonnoi-3 için $\delta^{13}C$ ‰+2,27 ve $\delta^{18}O$ ‰-3,12 olduğunu ifade etmiştir.

Brilli ve diğ. (2005), Akdeniz'deki klasik mermer ocaklarıyla ilgili araştırmalar yapmışlardır. Ege bölgesinde yer alan antik ocaklarıda yaptığı bu çalışmada $^{87}Sr/^{86}Sr$ izotop oranları ölçülmüş ve Akdeniz bölgesi antik mermer ocaklarının Sr izotop veri tabanı oluşturmaya çalışılmıştır. İncelemeler sonucunda $^{87}Sr/^{86}Sr$ izotop oranlarının Akdeniz havzasındaki Carrara, Paros, Naxos, Pentelikon, Dokimeion, Hymettus antik ocaklarından alınan beyaz mermerler için 0,7071 ile 0,7092 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.

Unterwurzacher ve diğ. (2005), Fashendorf'un (Carinthia-Avusturya) Roma mezar alanında kazılar sırasında çıkan antik mermer eserlerin kaynak alanının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bu eserlerin, Roma döneminde, özellikle Akdeniz havzasındaki mermerlerden yapıldığını, bununla birlikte doğu Alp bölgesi mermerlerinin de olabileceğini ifade etmişlerdir. Kaynak alanı belirleme çalışmaları için beş eser üzerinde mineralojik-petrografik analizler, MGS ölçümleri ve C-O duraylı izotop analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu örneklerin makroskopik ve mikroskopik özelliklerinin oldukça benzer olduğunu, bu sonuçtan yola çıkarak incelenen örneklerin aynı kökenli mermer tipinden yapıldığı sonucuna varmışlardır. Faschendorf kazı alanı eserlerinin MGS ve ortalama tane boyu analizleri sonucunda Carinthia bölgesindeki Gummern mermer ocağındaki örneklerle oldukça benzer olduğunu belirlemişlerdir. Jeokimyasal açıdan Faschendorf mermer örneklerinin Sr ve Mn içeriklerinin oldukça sınırlı dağılım gösterdiğini, Ba, Fe, Mg ve Zn

içeriklerinde ise önemli bir değişim görülmediğini belirtmişlerdir. İncelenen eserlerin izotop çalışmaları ile Akdeniz havzasındaki daha önce yapılan çalışmalar karşılaştırıldığında Faschendorf mermer örneklerinin olası kaynak alanının Dokimeion (Afyon-Türkiye) bölgesinin olabileceğini, ancak MGS analizlerinde benzer sonuçların ortaya çıkmadığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak Faschendorf kazı alanı eserlerinin muhtemel kaynağının Gummern olduğunu ifade etmişlerdir.

Yavuz ve diğ. (2005), Menderes Masifi'nin güneyinde Permo-Karbonifer'den Paleosen'e kadar dört stratigrafik seviyeden alınan Muğla Siyah (Permo-Karbonifer), Muğla Beyaz (Kretase), Milas Limon, Lila, Aubergine (patlıcan moru), Pearl (sedefli), Damarlı, Beyaz (Triyas) ve Ege Bordo (Paleosen) olarak bilinen mermer örneklerinin mineralojik, kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Güneybatı Türkiye'deki mermerlerin başlıca siyah, beyaz, gri damarlı/bantlı ve kırmızı olmak üzere farklı renklerde olduklarını, beyaz renkli mermerlerin başlıca dolomit ve kalsit minerallerinden oluştuklarını belirlemişlerdir. Mermerlerin çatlak ve/veya süreksizliklerinde görülen mika gibi safsızlıkların mermerleri renklendirdiğini ifade etmişlerdir. Mermerlerin renginin ve tane şeklinin aynı ocak içerisinde bile değişim gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Albustanlıoğlu (2006), Roma imparatorluk döneminde Anadolu mermer ocaklarının işletme ve üretim stratejisi ile ocak organizasyonunu, Dokimeion (İscehisar-Afyon) ocaklarını esas alarak incelemiştir. Araştırmacı bu çalışmada üretim stratejisinin zaman içindeki değişimini ve buna paralel olarak ocak organizasyonunun nasıl şekillendiğini incelemiştir. Ocak yazıtları ocaklardaki işletme rejimi ve üretim biçiminin zaman içinde gerek şekil, gerekse içerik yönünden büyük ölçüde değişime uğradığına işaret eden araştırmacı üç farklı tip yazıtta ocak organizasyonunu incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre; I.tip yazıtlar en eski üretim biçimi olan yüklenici eliyle üretim yapıldığını göstermekte olup, bu yazıtlarda yüklenici adı, tarih ve bir kimlik numarası gibi üç ana unsur bulunmaktadır. II.tip olarak tanımlanan yazıtlar I. tip yazıtlardaki asli unsurlara ilaveten taşın çıkarıldığı coğrafi bölgeyi gösteren bir sözcük (bracchium) ve taşın çıkarıldığı ocağı belirten bir diğer sözcüğü (locus) kapsamaktadır. III.tip yazıtlarda önceki yazıtlarda belirtilen unsurlara ek olarak taşın çıkarıldığı yeri gösteren ve aynı zamanda bir kimlik

numarası olan bir sayı (locus); taşın çıkarıldığı coğrafya (bracchium); son olarak üretim tarihi yazmaktadır.

Özer (2006), Marmaris Hisarönü'ndeki arkeolojik kazılarda bulunan 18 adet amfora parçası üzerinde mineralojik-petrografik ve jeokimyasal analizler yapmıştır. Kazı alanının yakın çevresinde belirlenen ocaklardan siyah ve kırmızı renkli kil örnekleri alarak benzer analiz çalışmaları yapmış ve elde ettiği sonuçları karşılaştırarak hammadde kökeni açısından aralarındaki farkları ve benzerlikleri ortaya çıkarmıştır. Kimyasal analiz sonuçlarına göre Hisarönü amforalarının Rodos amforalarının kimyasal içeriğine benzediğini, Hisarönü ve Rodos bölge jeolojilerinin birbirine benzer olması nedeniyle hammadde kaynaklarının da benzer olmasının normal olduğunu ifade etmiştir. Bölgeden alınan iki adet kil örneği üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçlarına göre kırmızı renkli kil örneğinin Hisarönü amforalarının kimyasına daha yakın olduğunu belirlemiştir.

Tarhan (2006), Laodikeia antik kentinde 2002-2003 yılı kazılarında bulunan kabartmaları incelemiş ve antik kentteki yontu sanatının gelişimini araştırmıştır. Kabartma örneklerinin bir araya toplanmasının ardından olanaklar ölçüsünde parçaların incelenmesi, araştırılması ve kentin yontu atölyeleri hakkında daha detaylı bilgilere ulaşmayı amaçlamıştır. Çalışmalar sonucunda kentte Helenistik Dönem'den Erken Bizans Dönemi'ne kadar faaliyet gösteren yerel atölyelerin olabileceğini ifade etmiştir. Roma Dönemi'ne tarihlenen eserlerde genel olarak, M.Ö. 4. yy'ın ve Bergama sanatının etkileri hakim olmakla birlikte, figürlerin elbise kıvrımlarında derin kanallı ışık-gölge etkisinin verilişinde, Aphrodisias etkilerinin de olduğunu saptamıştır.

Muşkara (2007), Emecik (Datça-Muğla) figürinlerini bazı ana, eser ve nadir toprak elementleri içerikleri açısından incelenmiş ve elde ettiği sonuçları Emecik civarındaki bir taş ocağından alınan örneklerin bileşimi ile karşılaştırmıştır. Sonuç olarak Emecik figürilerinin çevresinde yer alan Alkaya (veya Taşkent), Güngörköy ve Değirmen tepe ocaklarıyla ilgili olmadığını, daha çok Kıbrıs ve çevresindeki ocaklarla ilişkili olabileceğini belirtmiştir.

Attanasio ve diğ. (2008), Marmara Adasındaki 23 farklı ocak alanından (397 örnek) tarihi eser ve ocak örnekleri toplamışlar, bu örnekler üzerinde petrografik, C-O

izotop analizi ve EPR ölçümleri yapmışlardır. Araştırmacılar elde ettikleri sonuçları kullanarak Proconnesos mermerleri için güncellenmiş ve en geniş arkeometrik veri tabanı oluşturmuşlardır. Buldukları yeni sonuçları eski verilerle karşılaştırarak doğruluğunu güçlendirmişlerdir.

Tokgöz (2008), Niğde ili sınırları içerisinde bulunan Bahçeli Roma Havuzu ve Kemerhisar kasabasındaki su kemerlerinin mühendislik özellikleri ile kullanılan yapı taşlarının özelliklerini incelemiştir. Belirlenen antik yapıları ayrı ayrı değerlendirerek kullanılan yapı taşlarını makro ölçekte incelemiştir. Ayrıca yapı taşlarının alındığı antik taş ocaklarını ve bu ocaklardaki taş örneklerinin fiziko-mekanik özelliklerini ortaya çıkarmıştır. İncelemeler sonucunda Bahçeli Roma Havuzunun iki tip mermerden, Kemerhisar kasabasındaki su kemerinin ise beş tip travertenden yapıldığını, yapılarda kullanılan taşlarda taş seçiminden ve işlenmesinden kaynaklanan sorunlar ile atmosferik etkilere bağlı taş bozunmalarının varlığına işaret etmiştir.

Antonelli ve diğ. (2009), Annaba (Cezayir)'dan çok uzak olmayan Cap de Garde'deki mermer ocaklarının mineralojik-petrografik ve jeokimyasal özelliklerini ilk kez ortaya çıkarmışlardır. Romalılar tarafından geleneksel mimarı ve dekoratif-süs amaçlı olarak kullanılan "greco scritto" mermerlerinin kaynak alanının bu bölge mermerleri olabileceği arkeologlar tarafından ifade edilmiştir. Bu nedenle Kuzey Afrika'nın altı önemli Roma şehrinde (Cezayir'deki Hippo Regius ve Cuicul; Fas'daki Volubilis; Libya'daki Cyrene; Tunus'taki Carthage ve Utica) kullanılan "greco scritto" mermerlerinde yapılan incelemeler sonucunda, bu mermerlerin amfibolit - yeşil şist fasiyesinde bölgesel metamorfizmaya uğramış, kırıntılı bileşenlerce zengin dolomitik kireçtaşlarının ürünü olduğunu ifade etmişlerdir. MGS analizlerine göre belirtilen antik kentlerdeki bazı mermerlerin Aliki ocağındaki (Thasos-Yunanistan) Proconnesian ve Thasian mermerlerine benzediğini, izotop değerleri bakımından ise belirgin olarak ayrılığını ifade etmişlerdir. Araştırmacılar "greco scritto" mermerlerinin izotop bileşimlerinin Naxos mermerleri ile çakıştığını ancak Naxos ve "greco scritto" mermerlerinin petrografik özelliklerinin farklı olduğu sonucuna varmışlardır. Tüm bu sonuçlara göre Roma dönemi Akdeniz havzasında kullanılan "greco scritto" mermerlerinin farklı kaynak alanlardan derlendiğini, Kuzey

Afrika ve Annaba (Cezayir) civarında da önemli sayıda mermer ocakları olduğunu ifade etmişlerdir.

Borghi ve diğ. (2009), 8 adet tarihi Piedmont mermer örnekleri üzerinde petrografik, elektron mikroskobu ve duraylı izotop analizlerine dayanan çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda farklı analitik teknikler kullanarak mermerlerin detaylı bir tanımlamasını vermişlerdir. Araştırmacılara göre tarihi Piedmont mermer örnekleri farklı metamorfik koşullarda ve jeolojik yaşlarda oluşmuşlardır.

Kidd ve diğ. (2009), Missouri Üniversitesi Arkeoloji ve Sanat Müzesindeki (Roma ve Yunanistan heykelleri) dokuz beyaz mermer eserin [(Portrait of a Ptolemaic Queen, Portrait of the Emperor Nero, Portrait of the Emperor Hadrian, Portrait of an Empress, Archaizing Hermes (Fragment of a Neo-Attic Krater), Young Girl with a Bird, Autumn Figure (from Seasons Sarcophagus), Unidentified Figure (Fragment of an Asiatic Sarcophagus), Stele with Horseman ve Inscription to the Great Mother)] yapımında kullanılan mermerlerin kaynağını tespit etmeye çalışmışlardır. Araştırmacılar bu çalışmada C - O duraylı izotop, EPR ve petrografik analizleri kullanmışlardır. Sonuç olarak Kuzey Afrika'dan getirilen üç eser örneğini (Ptolemaic Queen, Nero, Roman Empress) oluşturan beyaz mermerlerin ithal edildiğini ortaya çıkarmışlardır. Bununla birlikte Mısır'daki Ptolemaic ve Roma heykel başları için Parin mermerinin yaygın olarak kullanıldığını ifade etmişlerdir. Kuzey Afrika'da farklı yerlerdeki veya Tunustaki Roma heykellerinde Proconnesian mermerlerinin kullanıldığı doğrulamak için daha çok araştırmaya ihtiyaç duyulduğunu söylemişlerdir. "Young Girl with a Bird" ve "Great Mother" eselerinde kullanılan mermerlerin yakın kaynaklardan kullanıldığını öne sürmüşlerdir. "Autumn Figure" ve "Asiatic Sarcophagus" mermerlerinin kaynağının heykel üretim merkezi olarak iyi bilinen Proconnesian (Marmara Adası-Türkiye) ve Dokimeion (Afyon-Türkiye) ocakları olduğunu ortaya çıkarmışlardır. "Portrait of the Emperor Hadrian" ın kaynağının Göktepe (Muğla-Türkiye) mermerleri olduğunu belirtmişlerdir.

Antonelli ve diğ. (2010), Cezayirdeki Roma kasabası Cuicul'da bulunan bölgesel ve ithal mermerler üzerinde arkeometrik çalışmalar yapmışlardır. Ayrıca Kuzey Afrika'da üç önemli arkeolojik bölgenin (Fas'daki Volubilis, Cezayir'deki Djemila ve Mısır'daki İskenderiye Feneri) koruma ve onarım çalışmaları için bilgi sağlamayı

da amaçlamışlardır. Antik Cuicul kasabasındaki mimari yapılarda ve heykellerde kullanılmış beyaz mermerler ile renkli süs taşlarının (ithal edilmiş) kaynağını tespit etmek, tanımlamak ve özelliklerini belirlemek amacıyla mineralojik-petrografik ve C-O duraylı izotop analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalar sonucunda yapılarda kullanılan mermerlerin yedi farklı litotipten oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bunlardan dördü Yunanistan kökenli [Karystos'daki (Eubea Adası) marmor carystium olarak da bilinen 'cipollino verde'; Larisa'daki marmor thessalicum olarak bilinen 'verde antico'; Skyros adasındaki marmor scyreticum olarak bilinen 'breccia di ve Krokea'ya (Sparta, Lakonia) yakın Stephania'daki lapis lacedaemonius olarak bilinen 'porfido verde antico'], biri Orta Asya kökenli [Kozak'taki (Bergama-Türkiye) marmor mysium (Mysian granite); Venus Tapınağı içerisine yerleştirilmiş altı kolonda kullanılmıştır] ve diğer ikisi Kuzey Afrika kökenli [Chemtou'daki (Numidia, Tunisia) marmor numidicum olarak bilinen 'giallo antico'] olduğunu ifade etmişlerdir. Mimaride ve heykellerde kullanılmış beyaz mermerlerin analiz sonuçlarından 'greco scritto'nin farklı çeşitleri yanında ithal edilen Yunanistan litotipleriyle (Pentelic mermer, Thasian mermerinin dolomitik türü ve Lakkoi'dan Parian mermeri) birlikte Filfila'dan (Skikda) bölgesel ince taneli litotipin sıklıkla kullanıldığı sonucuna varmışlardır. Ancak petrografik ve jeokimyasal değerlendirmeler sonucunda Annaba (Cezayir) yakınındaki Cap de Garde ocağındaki klasik 'greco scritto' için bir karşılaştırma yapamamışlardır.

Demirkıran (2010), Kilikya Bölgesi'ndeki yapılarda, lahitlerde ve plastik eserlerde (heykel, kabartma, figürin) yaygın olarak mermer kullanıldığını, Kilikya Bölgesindeki mermer buluntuların kökeninin tespiti ve alındıkları yerlerin bilinmesinin bölgenin diğer yerleşim yerleri ile ilişkileri hakkında bilgi sağlayacağını belirtmiştir. Ayrıca Tarsus Müzesi ve Mersin Müzesi aracılığıyla Kilikya Bölgesinin çeşitli yerlerinden elde edilmiş mermer eserlerden örnekler almış ve Afyon, Burdur ve Muğla mermerleriyle karşılaştırmasını yapmıştır. Örnekler üzerinde yapılan XRD analizleriyle dolomit minerali içeren mermerlerin sertliklerinin daha fazla olduğu için mimari yapılarda kullanıldığı sonucuna varmıştır. Ayrıca analizler sonucunda çok farklı sonuçların elde edilmesi Kilikya Bölgesi'nde pek çok mermer türünün kullanıldığının, bu sonucun ise Kilikya Bölgesinde bölge içi ve bölge dışı ticaretin oldukça gelişmiş olduğunun bir göstergesi olduğu sonucuna varmıştır. Kilikya

Bölgesi'ndeki plastik eserlerde ve mimari eserlerde kullanılan mermerlerde de farklılıklar saptamıştır. Roma Döneminde Marmara Adasından (Prens Adaları-Proconnessos) sütunlar ve lahitler yarı işlenmiş şekilde Akdeniz ve Karadeniz'e ihraç edildiği için Tarsus Müzesindeki Lahitten alınan parçanın XRD sonuçları ile Marmara mermerinin XRD sonuçları karşılaştırılmış ancak bir sonuç elde edilememiştir.

Duman (2010), Laodikeia antik kentindeki kazı ve yüzey araştırmaları çalışmalarında elde edilen Helenistik ve Erken Roma Dönemi seramiklerini incelemiştir. Özellikle Asopos (Gümüşçay) Tepesi'nde son yıllarda gerçekleştirilen kazılarla ortaya konulduğu üzere M.Ö. 3000 itibaren seramikle iç içe olan antik kentte yerel anlamda seramik üretim geleneği, M. Ö. 3. yy'ın ikinci çeyreğinde Seleukoslar tarafından yeniden yapılandırılmasının hemen ardından başlayarak M.S. 2. yy'a kadar devam ettiğini tespit etmiştir. Laodikeialı çömlekçilerin yerel olarak ürettikleri çanak çömleğin başında basit astarlı kâse ve tabakların yanı sıra, kabartmalı kâseler, gri hamurlu kaplar, kurşun sırlı seramikler ve Lykos Skyphosları olarak adlandırılan içki kaplarının da yer aldığını bulmuştur. Ayrıca Laodikeia'nın Phrygia, Karia ve Lydia Bölgeleri'nin kesişme noktasında yer alması ve ana ticaret yollarının buradan geçmesi nedeniyle Bergama, Efes gibi dönemin önde gelen kentlerinden ele geçen kap gruplarından ithal edilen seramiklerin de kentin seramik üretimi içinde yer aldığını tespit etmiştir.

Ebert ve diğ. (2010), Yunanistan-Naxos alanındaki farklı ocaklardan mermer örneklerini karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma için mermerlerin mikro dokusal (tane boyu analizleri) ve katodolüminesans analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bunun yanında mermerlerin renk incelemeleri, izotop analizleri, LA-ICPMS ile iz ve nadir toprak element analizlerini de gerçekleştirmişlerdir. Bölgeden alınan mermerlerin izotop sonuçlarını Gorgoni ve diğ. (2002)'de yaptığı çalışma ile karşılaştırmışlar ve Naxos mermerlerinin daha geniş bir dağılıma sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca izotop sonuçları sadece Naxos bölgesinindeki mermer örneklerini kapsadığı için benzer sonuçları verdiğini ve bu nedenle bölgesel bir ayrıma gidilemediğini ifade etmişlerdir. Jeokimyasal incelemelerde de Naxos mermerlerinin benzer kimyasal özellik sergiledikleri sonucuna varmışlardır. Renk parametresi ise tam bir ayırım sağlayamamıştır. Fakat Naxos bölgesinde eşsıcaklık (isotherm) eğrisine karşılık

katodolüminesans ve mikro dokusal özellikleri değişim gösterdiği için bu ikisi arasındaki ilişki farklı tarihi mermer ocakları arasındaki ayırım için çok hassas bir araç olmuştur. Ayrıca katodolüminesans sonuçları farklı bölgelerdeki mermer sonuçlarıyla karşılaştırılarak kaynak alanına yönelik çalışmaları mümkün hale getirmiştir. Bu çalışma jeolog ve arkeologlar için iyi bir mikro dokusal veri tabanı sağlamıştır.

Jarc ve diğ. (2010), Slovenya'daki Pohorje Dağlarında olası kaynak alanlarındaki mermerlerin özelliklerini belirlemek için petrografik, jeokimyasal, izotop analizleri ve EPR tekniğini kullanmışlardır. Ayrıca Slovenya'da bulunan mermer lahitlerin kaynak alan analizleri için Akdeniz veya Avusturya'da bilinen diğer antik mermerlerle karşılaştırmasını yapmışlardır. Sonuçta Pohorje mermerlerinin, tane boyutları yanında hem izotopik hem de jeokimyasal parametrelerinin oldukça heterojen olduğunu, çoklu teknik yaklaşımları kullanarak Pohorje mermerlerini Roma ocakları ve diğer antik ocaklardan ayırabilmişlerdir. Diskriminat analizleri ve birleştirilmiş parametreler kullanılarak Pohorje Dağlarında çeşitli mermer mostraları kendi arasında sınıflandırmışlardır. Ancak Avusturya'da Gummern-Krastal ve Pohorje ocakları arasındaki ayırım sorununu çözmenin kolay olmadığını ve daha sistematik çalışma gerektirdiği sonucuna varmışlardır.

Kantekin (2010), Aydın ve Muğla illeri sınırında yer alan Bafa Gölünün güneyinde ve güneydoğusundaki antik mermer ocaklarını incelemiştir. Tez kapsamında antik mermer ocakları, ocaklarda uygulanan teknikler, kullanılan aletler, alanda bulunan yarı işli ocak ürünleri ve bunların nakliyesi konusunda çalışmalar yapmıştır. Araştırmacı bu amaçla Latmos ve Miletos ocaklarını karşılaştırmış, ocak işletme yöntemlerinin jeolojik yapı ile ilişkli olduğu sonucuna varmıştır. Bununla birlikte Miletos ocaklarında yarı işli blokların yaygın olarak bulunduğunu, Latmos ocaklarında ise rezervlerin çoğunun kullanılmış olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca her iki ocakta da benzer çıkarma tekniklerinin kullanıdığı sonucuna varmıştır. Didyma Apollon Tapınağına blokların deniz yoluyla taşındığını yazılı kaynaklardan saptamıştır.

Maniatis ve diğ. (2010), Selanik (Yunanistan) bölgesindeki Roma dönemi yerel üretim lahitlerinin yapımında kullanılan mermerlerin kökenini araştırmışlardır. Bu

çalışmada Selanik Müzesindeki 23 adet lahit örneği üzerinde üç farklı analiz tekniği (EPR, C-O izotop analizi ve MGS ölçümleri) kullanmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre lahit yapımında kullanılan örneklerin Taşöz Adasındaki üç farklı ocaktan geldiği sonucuna varmışlardır.

Melfos ve diğ. (2010), Bu çalışmada Thessaly (Atrax bölgesini de içerir), Tempi, Chasanbali ve Tisaion'daki dört antik mermer ocağındaki mermer türlerinin duraylı izotop oranlarını ($\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$), petrografik ve mineralojik özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçları daha önce Kastri, Kalochorion ve Gonni'de yapılan mevcut veri tabanlarıyla karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak Thessaly antik mermer ocakları için verilerin güncellenmesini sağlamışlardır. Thessaly (Atrax bölgesini de içerir), Tempi, Chasanbali ve Tisaion'daki dört farklı bölgeden gelen örneklerin petrografik ve mineralojik özelliklerin farklı olduğunu ifade etmişler ve bu sonuçları duraylı izotop sonuçlarıyla birleştirerek mermerlerin kaynak alanlarını belirleyebilmişlerdir. Tamamlanan bu verilerle Antik Larisa Tiyatro yapısında kullanılan mermerlerin kaynak alanını başarılı bir şekilde tanımlamışlar ve Thessaly'daki antik anıtlar için gelecekteki bezer çalışmalar için yararlı bir araç olarak kullanılmasını sağlamışlardır.

Prochaska ve diğ. (2010), Belevi/Antalya' da bulunan anıt mezarda kullanılan mermerlerin olası kaynak alanını araştırmışlardır. Bu çalışmada mermerleri oluşturan kalsit ve dolomit minerallerinde mikro kapanım olarak ortaya çıkan sıvıların kimyasal analizini yapmışlardır. Bu yeni yaklaşım kullanılarak izotop bileşimi bilinmeyen farklı mermer gruplarının ayrılmasının mümkün olduğunu göstermişlerdir. Çalışma sonucu elde edilen jeokimyasal ve sıvı kapanım verilerine göre; daha önceki çalışmalarda anıt mezarda kullanılan mermerlerin kaynak alanı olarak gösterilen Belevi ve Kuşini'nde bulunan antik ocakların aslında kaynak alanı olmadığını ortaya çıkarmışlardır.

Yavuz ve diğ. (2011), Efes (İzmir) ve çevresindeki 16 antik ocaktan 244 tane mermer örneği üzerinde farklı analiz teknikleri kullanarak, Efes bölgesi mermerleri için güncellenmiş veri tabanı oluşturmuşlardır. Örneklerin büyük çoğunluğunu oluşturan beyaz renkli mermerlerin petrografik ve optik özelliklerine ek olarak EPR ve izotop karakteristiklerini belirlemeye çalışmışlardır.

Şalbaş (2012), Laodikeia Antik Kentine ait seramiklerin tarihini genel biçimde ele alıp kronolojik olarak incelemiştir. Bununla birlikte özellikle Erken Bizans Dönemine ait kazıma-kabartılı tabakları detaylı biçimde araştırmıştır. Eserler hammadde, dekor, teknik gibi fiziksel başlıkların yanında köken ve yayılış gibi tarihsel ve coğrafik etmenlere göre araştırılmış ve günümüz koşullarında yeniden üretimi denenmiştir. Araştırma sırasında benzer biçim ve dekorlu örneklerin Laodikeia buluntusu dışında Saraçhane, Sardeis, Yumuktepe, Pergamon ve Allianoi'de de bulunduğunu belirlemiştir. Bu tabakların tam olarak ne amaçla üretildiği belli olmamakla birlikte Laodikeia'ya ait yerel üretim olduğu ifade etmiştir. Ayrıca eserlerde betimlenen sahnelerin daha çok doğu toplumlarına özgü olduğunu belirtmiştir.

Topal (2012), Denizli Grabeni kenarında ve içinde bulunan önemli fayların morfo-tektonik özelliklerini çalışmıştır. Topoğrafik verilerden yararlanarak birçok morfometrik hesaplamalar yapmış, bu verileri tarihsel ve aletsel dönemdeki deprem verileri ile karşılaştırarak fayların günümüzdeki aktivitesini ortaya çıkarmaya çalışmıştır. Sonuç olarak Denizli Grabenini sınırlayan kenar faylarının aktif olduğunu ve dağ önlerini denetlemeye devam ettiğini belirlemiştir.

Taelman ve diğ. (2013), Antik bir Roma kasabası olan Ammaia'daki (Portekiz) eser örneklerinin jeolojik kökenini saptamak için petrografi ve stronsiyum (Sr) izotop analizleri kullanmışlardır. Ammai'daki mermer eser örneklerinin olası kaynak alanı olarak gösterilen Alter do Chão, Assumar, Elvas ve Estremoz mermer örnekleriyle ilk kez mineralojik ve petrografik karşılaştırmaları gerçekleştirmişlerdir. Ancak Alter do Chão, Assumar ve Elvas mermerlerinde gözlenen vezüvyanit, epidot, klorit, garnet türü silikat minerallerinin Ammaia mermerlerinde olmadığını ancak Estremoz mermerlerinin benzer mineralojik-petrografik özellik gösterdiğini belirlemişlerdir. Bu nedenle Alter do Chão, Assumar ve Elvas bölgelerinin kaynak alanı olamayacağını ifade etmişlerdir. Estremoz' dan alınan 10 örnek üzerinde $^{87}Sr/^{86}Sr$ ölçümleri gerçekleştirmişler ve sonuçların Ammaia'daki değerlere benzer olduğu sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte Ammaia eserlerini başlıca Hispanic (İspanya ve Portekiz bölgesindeki ocaklar) ve Akdeniz havzası mermerleri ile karşılaştırmış, sadece Estremoz, Almadén de la Plata veya Pentelicon mermer ocaklarının olası kaynak alanları olabileceğini söylemişlerdir. Ancak jeolojik bilgilerden Almadén de

la Plata ve Pentelicon bölgesinin uzak, mermer taşınmasının zor ve maliyetli olduğunu tespit ettikleri için bu iki ocağı da elemine ederek, en olası kaynağın Estremoz bölgesindeki mermer ocakları olduğunu ifade etmişlerdir.

3.LAODİKEİA ANTİK KENTİNİN TARİHÇESİ

Denizli İlinin 6 km kuzeyinde, Eskihisar, Goncalı, Bozburun Köyleri sınırları içinde kalan ve Lykos Ovası'nın ortasında yer alan Laodikeia bir Frigya kentidir. Kuzeydoğusunda Lykos (Çürüksu), güneydoğusunda Kapros (Başlıçay) ve güneybatısında Asopos (Gümüşçay, Goncalı Deresi) olmak üzere üç tarafı ırmaklarla çevrilen yüksek bir tepe üzerine kurulmuştur (Şimşek 2007; Şalbaş 2012).

Helenistik Dönem Laodikeia'sı, Seleukos (Suriye) Kralı, II.Antiokhos tarafından eşi Kraliçe Laodike adına, M.Ö. 3.yy'ın ortasında kurulmuştur. Bu durumda Helenistik kentin kuruluş tarihi, II.Antiokhos'un tahta geçtiği M.Ö. 261 ile Ptolemaios'un kızı Berenike ile evlenmek üzere, Laodike'den boşandığı M.Ö. 253 yılları arasında gerçekleşmiş olmalıdır. Helenistik Dönem'de Büyük İskender'in halefleri tarafından birden çok Laodikeia kurulduğu için kent, yanında bulunan ırmakla ayırt edilerek Laodikeia ad Lycum (Lykos Laodikeia'sı) olarak adlandırılmıştır (Tarhan 2006; Şimşek, 2007).

Lykos (Çürüksu) Vadisi M.Ö. 190 yılında Seleukos Krallığı ile Romalılar arasında yapılan Magnesia Savaşı'na kadar Seleukos Hanedanlığı yönetiminde kalmıştır. Bu savaşı, Bergama'nın desteğinde kazanan Romalılar M.Ö. 188 yılında imzalanan Apameia (Dinar) Barışıyla o bölgedeki Seleukos topraklarını Bergamalılara bırakmıştır. Bergama Krallığı da daha sonra III.Attalos'un M.Ö. 133 yılında ölmesiyle ve Kralın vasiyeti üzerine Roma İmparatorluğu'na bağlanmıştır. M.Ö. 129 yılından itibaren ise Batı Anadolu Küçük Asya Eyaleti'ne bağlanmış olup, Roma İmparatorluğunca atanan eyalet valilerince yönetim sağlanmıştır (Şimşek 2007; Şimşek 2011).

Laodikeia I. Mithridates Savaşı (M.Ö. 88-85) sırasında Pontos orduları tarafından kuşatılmış ve büyük zarar görmüştür. Lykos Vadisi ve komşu vadiler yıkılmış ve yağmalanmıştır. Laodikeia'yı Quintus Oppius adlı bir Roma generali savunmuştur.

VI. Mithridates, Oppius'u teslim ettikleri takdirde Laodikeia vatandaşlarına merhametli davranacağını söylemiştir. Kent bu isteğe uyar ve Laodikeia'lılar tarafından Mithridates'e götürülen Oppius basit bir savaş tutsağı muamelesi görür. Appian ve Strabon, Pontos'lu Mithridates yönetiminde Laodikeia ne olduğunu belirtmezler. Ama kentin özellikle Mithridates'in M.Ö. 63'deki son yenilgisi ve intiharından sonra hızla zenginleştiğini tahmin edebiliriz. Bundan sonra Strabon (XII 8.13) Laodikeia'yı Frigya'nın en büyük kenti olarak nakleder (Şimşek 2007).

Laodikeia antik dönemde Anadolu'daki en önemli ve en gelişmiş ticari merkezlerden biri olmuştur. Yün ticareti ve üretimi kente büyük zenginlik getirmiş ve Laodikeia'ya antik dünyada haklı olarak büyük bir ün kazanmıştır. Bu zenginliğin en büyük kaynağı Laodikeia'da yetiştirilen kuzgini siyah renkli bir tür koyun ve bunların yününde sağlanan dokuma ürünleridir (Şimşek 2007; Kuzu 2008).

İmparator Tiberius (M.S. 14-27) zamanında Laodikeia, Frigya'nın en görkemli ve zengin kentiydi. M.S. 60 yılındaki büyük depremde tüm Lykos Vadisi kentleri yok oldu. Hierapolis ve diğer kentler Roma İmparatorluğu yardımıyla ayağa kaldırılırken Laodikeia kendi kendini imar etmeyi başarmıştır. Polemon Hanedanlığının başlangıcından çok önce bir öğrenim merkezi olan Laodikeia'da septik (kuşkucu) filozoflar, Antiokhos ve Theiodos yetişmiştir. Tıp öğreniminin de çok önemli olduğu Laodikeia'da Strabon'nun zamanında Zeuxis tarafından büyük bir grup Herophileian (antik dünyanın en ünlü hekimi) tıp okulu kurulmuştur. Laodikeia Geç Cumhuriyet ve Erken İmparatorluk dönemlerinde Kibyra (Gölhisar) Conventusu'nun önemli bir kenti belki de başkenti olmuştur. Laodikeia'da Roma yönetimi kentin bir baş metropol olan Helenistik statüsünü yansıtır. Kentte tamamen gelişmiş bir sivil teşkilat, gymnasium ve komşu kentlerden olan yargıçlara saygı geleneği vardır (Şimşek 2007).

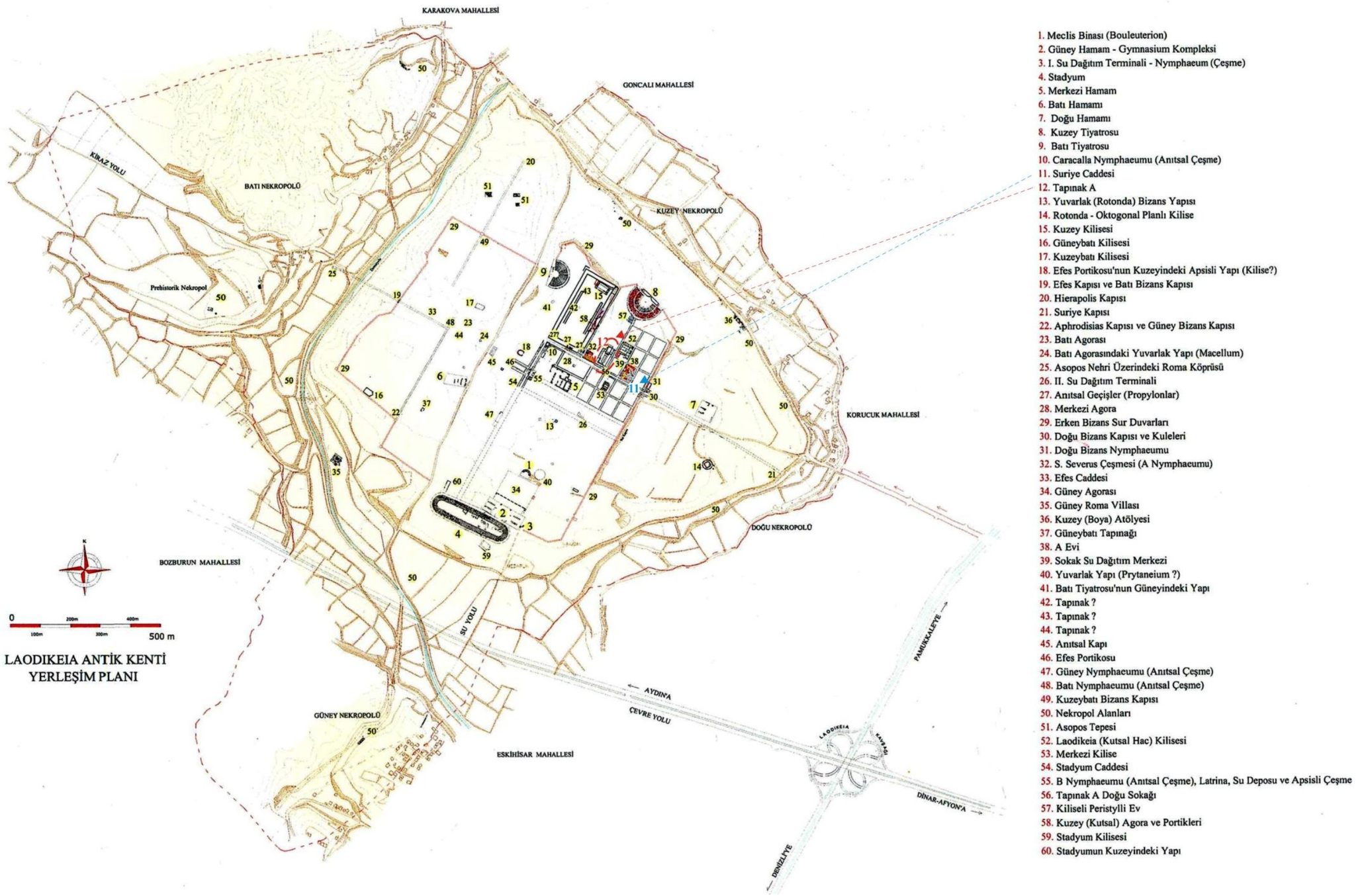
M.S. 2.yy'ın sonlarına doğru zenginleşen kent İmparator Commodus (M.S. 180-192) adına tapınak yaptırmış ve böylece Neokoros (Tapınak Koruyuculuğu) unvanını alarak vergiden muaf tutulmuştur. Kentin bu unvanı İmparator Caracalla (M.S. 211-217) ve Alexander Severus (M.S. 222-235) döneminde de devam etmiştir. İmparator Diocletinus'un (M.S. 284-305) Laodikeia'yı Frigya'nın Metropolisi ilan etmesi

(M.S. 290'dan sonra) kentin Roma ve Bizans Dönemi'nde eski statüsünü koruduğunu gösterir (Tarhan 2006; Şimşek 2007; Duman 2010).

Laodikeia M.S. 494'deki depremle tamamen yıkılmış ve bir daha toplanamamıştır. Bundan sonra kentteki yerleşmeler gittikçe küçülmüştür. M.S. 7.yy'ın ilk çeyreğinde (Focas 602-610) meydana gelen diğer büyük depremle kent yine yerle bir olmuştur. Bu deprem arkasından Denizli-Başpınar kaynağından gelen suyolları bozulmuştur. Ovanın ortasında yer alan kent, aynı zamanda güvenlik nedeniyle özellikle Arap akınlarının etkisiyle, su kaynaklarının zengin olduğu ve saklanması daha kolay olan güneyde Salbakos (Babadağ) eteklerinde uygun olan değişik yerlere taşınmıştır. Bunlardan bir grup Kaleiçi'ne, bir grup Bereketli Hisarköyü ve Asartepe (Hisar)'ye giderek buralarda tehlike anında toplanabilecek savunma amaçlı küçük kaleler yapıp yaşamlarını sürdürmüşlerdir. Bölge 13.yy başında (1206) tamamen Türklerin eline geçince bu isim kısaltılarak Ladik şekline dönüştürülmüştür (Şimşek, 2007; Kuzu 2008; Duman 2010).

3.1 Tapınak-A (Sebasteion) Yapısının Özellikleri

Yapı Suriye Caddesinin kuzey yanında etrafı portiklerle çevrili (58 x 42.33m) dikdörtgen avlunun kuzey sonunda yer almaktadır (Şekil 3.1). Korinth düzenindeki prostylos planlı tapınak, Roma ayağı sistemine uygun (22.75 x 13.60m), yüksek podyumlu traverten bloklardan yapılarak, üzeri mermer kaplanmıştır. Hippodomik sistemde tapınak derinlemesine iki ada üzerine inşa edilmiştir. Naos bölümünün altındaki tonozlu bölümde tapınak hediyeleri saklanmış olup buraya güneydoğu köşede yer alan oval formlu ve tabana doğru gittikçe genişleyen merdivenle inilir. Antoninler Döneminde (M.S. 2.yy) yapılan tapınak İmparator Diocletianus Döneminde (M.S. 284-305) büyük çaplı tamirat geçirmiştir. Kazı bulguları yapının M.S. 4.yy'da arşiv olarak kullanıldığını, M.S. 494 yılı depreminde yıkılmasından sonra naosun iki yanına yapılan geç dönem yapılarıyla alanın kullanımına devam edildiğini göstermiştir. Avluda yer alan şapel ve buna bağlı diğer birimler bu geç dönem kullanımıyla ilgilidir. Daha sonraki dönemde tapınağa ait mermer mimari bloklar kireç ve taş ocağı olarak kullanılmıştır.



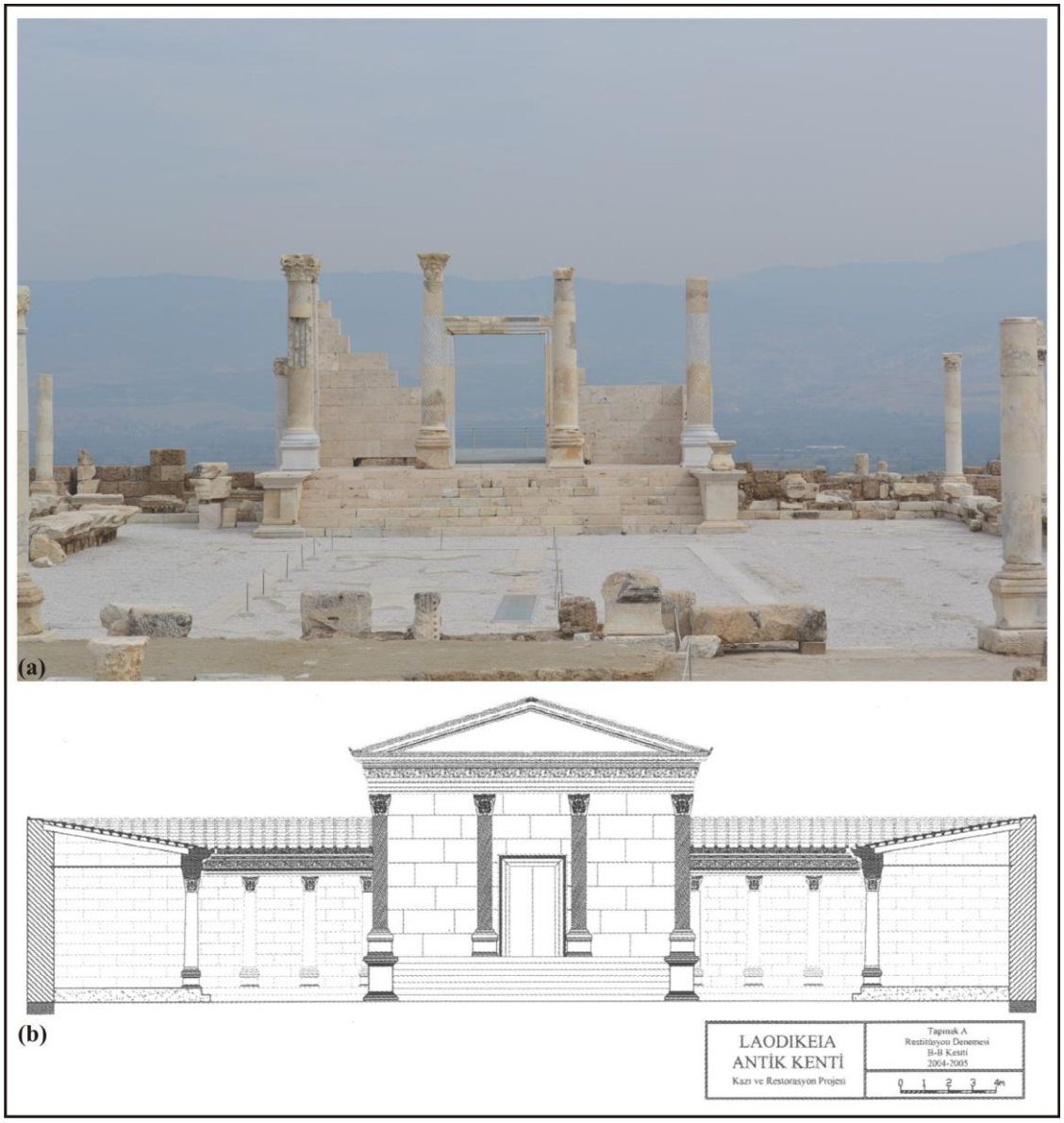
Şekil 3.1 : Laodikeia antik kentinin planı ve Tapınak-A yapısının konumu (Şimşek, 2007)

Çift sıra kesilmiş traverten bloklardan atkılı olarak yapılan naos duvarları, opus signium tarzında sıva üzeri mermer kaplamalı olarak yükselmekteydi. Önde avlu portik duvarlarının doğu ve batı birleşme kısımlarından itibaren en altta 0,41 m yüksekliğinde profilli mermer süpürgelik (toikhobate) kısmı, onun üzerinde 0,99 m mermer kaplamalı podyum duvarları ve bunun üzerinde de 0,41 m profilli podyum tacı, üst kısmında ise stylobat bölümünü oluşturan mermer blok sırası geliyordu. Tapınakta prostylos'u oluşturan 4 sütunda, pronaos'un iki yanında dikdörtgen ancak ön kısmı yarım daire şeklinde ve burgu yivli olan payeli sütun parçalarının bulunması, iki köşede paye sütun şeklinde iç kısımda yer alan iki sütun burgu yivli olarak düzenlendiğini göstermektedir (Şekil 3.2.a, b).

Batı köşede yer alan dört parça payeli burgu yivli sütun 4,77 m yüksekliğindedir. Prostylos'u oluşturan sütunlara önden bakıldığında yuvarlak burgu yivli, yandan bakıldığında düz olarak görülmektedir. Bu düzenlemeyle naos duvarına yaslanan portik plasterleriyle de uyum sağlanmıştır. 1,25 m yüksekliğinde kaideli postamentleri olan ve prostylosu oluşturan sütunların üzerinde Korinth düzenli başlıklar yer alır. 0,59 m yüksekliğindeki arşitravlar üç fakialı olup bunun üzerinde ranke bezemeli olan 0,46 m yüksekliğinde friz yer alır. Üçgen alınlığı oluşturan geisonısimaya ait bloklar kazılarla açığa çıkarılmıştır. Batı antasına zıt 0,84 m yüksekliğindeki başlığı ve batı portikoda naosla birleşen plaster postament ile 0,60 m yüksekliğindeki başlığı da yine kazılarda ele geçmiştir. Tapınak-A yapısının geniş bir avlusu bulunmaktadır. Avluya, güney ortada üç adet eşik taşının bulunduğu çift kanatlı kapıdan girilmektedir. Avlu dış duvarları naos duvarlarında olduğu gibi çift sıralı ve atkılı traverten bloklardan örülmüştür. Avluyu çeviren sütun sayısı plaster sütunlarla beraber toplam 54'dür (Şekil 3.2.a, b).

2004 yılı kazı çalışmalarında tapınağın avlusuna ait güneybatı portik gezinti alanında açığa çıkarılan tuğla döşemeler geometrik şekilde motifler oluşturmuştur. 2005 yılında doğu yönünde kalan döşemeler tamamen açığa çıkarılmıştır. Buradaki döşemeler batıdakilere göre daha düzensizdir ve tabanlarında oynamalar meydana gelmiştir. Güney portiği üzerindeki kapı eşiği, sütun, başlık, arşitrav-friz gibi mimari bloklarında duvar bloğu olarak tekrardan kullanılmasıyla oluşturulan mekanlar batı portiği üzerinde yapılan şapelle birlikte hıristiyanlıkla ilgili dinsel ve konut amaçlı

düzenlemeleri göstermektedir. Ayrıca avlunun bu bölümünde orijinal mermer döşemeler açığa çıkarılmıştır (Şimşek, 2007).



Şekil 3.2: Tapınak-A yapısının a) günümüzdeki görünümü b) D-B kesitli geçmişteki plan tasarımı (Şimşek, 2007' den alınmıştır)

4. LAODİKEİA KENTİ TAPINAK-A (SEBASTİON) YAPISI MERMERLERİNİN MİNEROLOJİK, PETROGRAFİK, JEOKİMYASAL VE DURAYLI İZOTOP ÖZELLİKLERİ

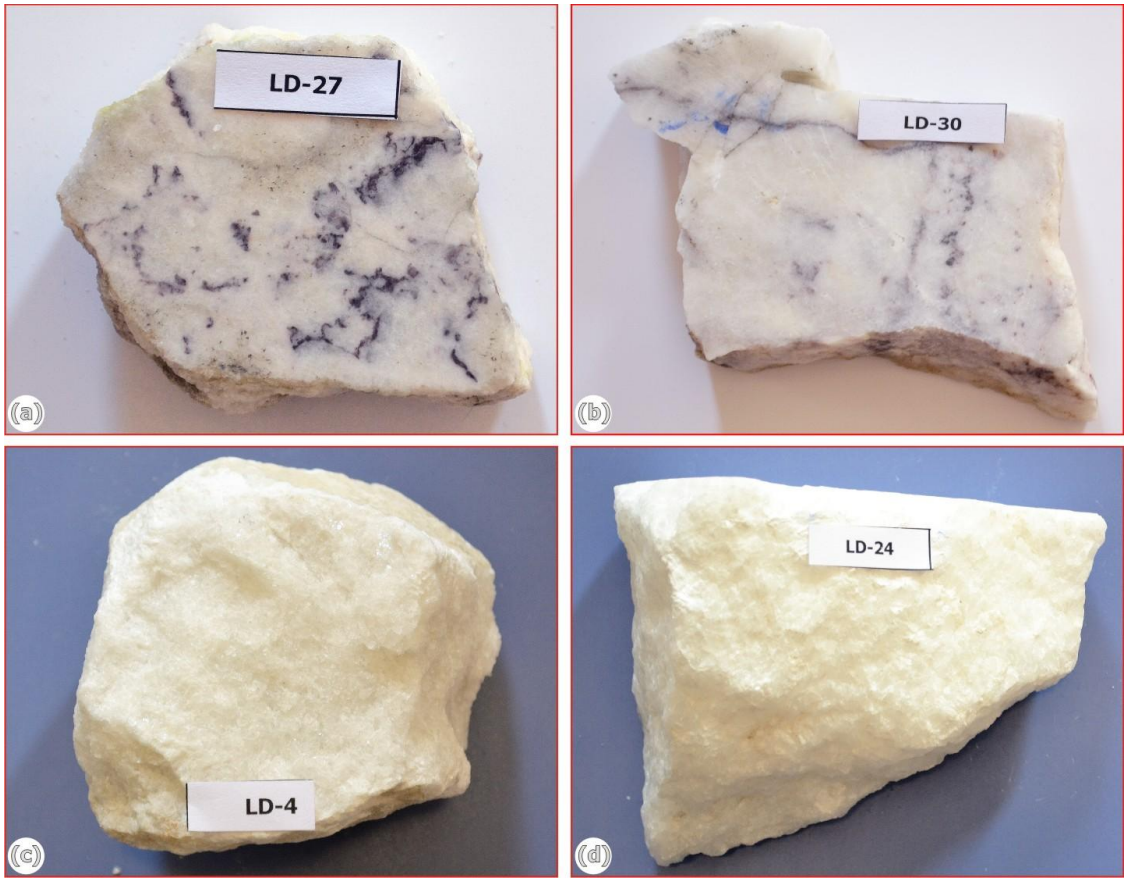
4.1 Laodikeia Tapınak-A Yapısı Mermerlerinin Makroskopik Özellikleri

Tapınak-A yapısı kazı çalışmaları sırasında ortaya çıkarılan ve kazı alanında biriktirilen mermer örnekleri incelenmiş, farklı renk ve doku özelliği gösterenlerinden örnek alınmıştır. Dört farklı renk ve doku özelliği gösteren mermer örneklerinden toplam 40 adet alınarak bu örneklerin petrografik ve spektroskopik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Laodikeia antik kenti Tapınak-A yapısında farklı renk ve doku özelliği gösteren başlıca dört farklı mermer türü belirlenmiştir. Bunlar; beyaz renkli lila-mor damarlı, beyaz, gri damarlı ve gri renkli mermerler olarak tanımlanmıştır.

Tapınak-A yapısında beyaz renkli lila-mor damarlı mermerler yaygın olarak kullanılmamasına rağmen bazı sütun yapılarının bu tür mermerlerden yapıldığı belirlenmiştir. Beyaz renkli lila-mor damarlı mermerleri oluşturan bileşenler çıplak gözle kolaylıkla görülmekte olup, kristal boyutları genellikle ince-orta (100µm-5mm) arasında değişmektedir. Bu renk mermerlerin en tipik özelliği lila-mor renkli damarlar içermesidir (Şekil 4.1.a, b). Damar genişlikleri 0.1-0.5 cm arasında değişmekte olup, düzensiz yapı gösterirler.

Beyaz renkli mermerler Tapınak-A yapısında en fazla görülen mermerlerdir. Sütun, korinth başlığı, paye bloğu gibi üzerinde kabartma ve işlemelerin bulunduğu bloklarda yaygın olarak beyaz renkli mermerler kullanılmıştır. Beyaz renkli mermerleri oluşturan bileşenler çıplak gözle kolaylıkla görülmekte olup, kristal boyutları genellikle orta-iri (2mm->5mm) arasında değişmektedir. Kristal sınırları genellikle düzgün çizgiler halinde olup, kristal yüzeyleri gün ışığında altında parlak yansıma göstermektedir (Şekil 4.1.c, d). Beyaz renkli mermer blokların bir kısmında

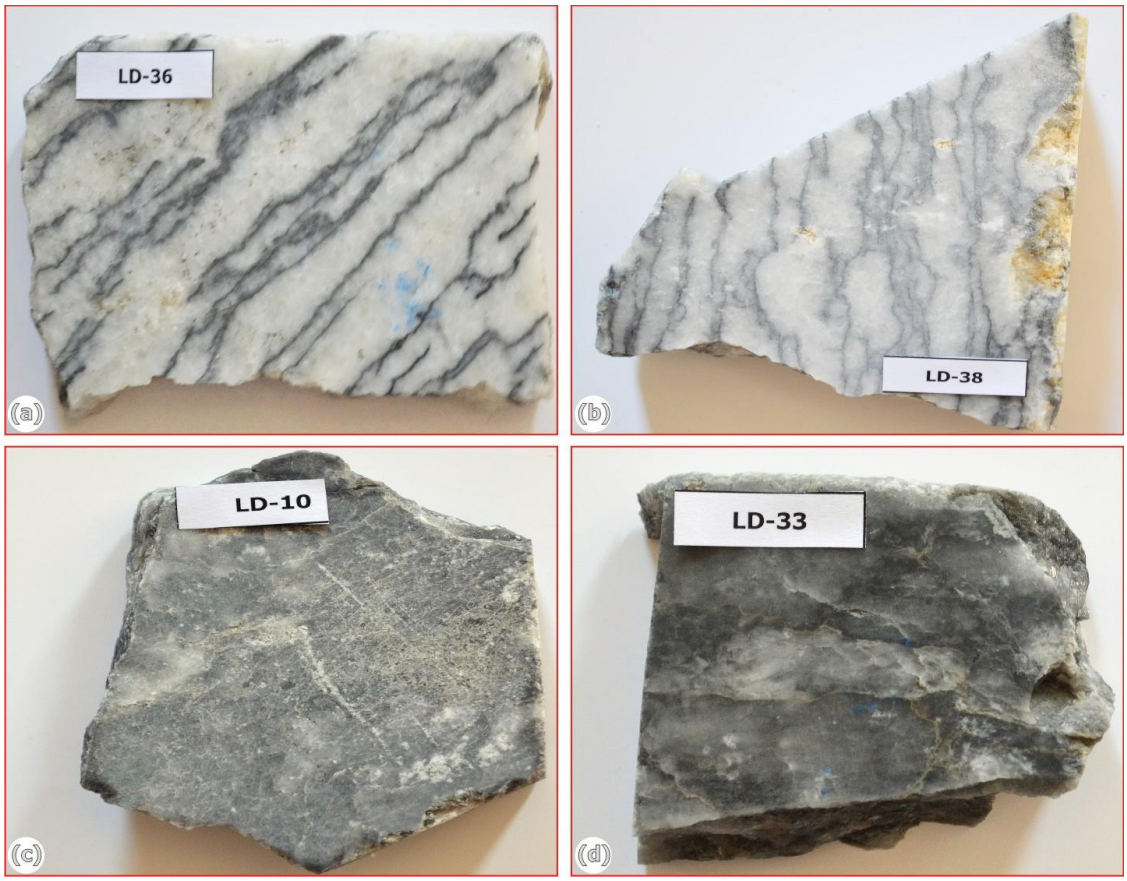
iklimsel faktörlerin etkisiyle yapısal bozulmalar görülmektedir. Bozulmaya uğrayan bloklarda, kabuklanma ile yüzeyden tabakalar halinde kopma ve dökülmeler meydana gelmektedir.



Şekil 4.1: Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan a, b) beyaz renkli lila-mor damarlı mermer örnekleri c, d) beyaz renkli mermer örnekleri

Beyaz renkli gri damarlı mermerlere çoğunlukla sütun yapılarında ve yer döşemelerinde rastlanılmaktadır. Beyaz renkli gri damarlı mermerleri oluşturan bileşenler çıplak gözle görülmekte olup, kristal boyutları genellikle ince-orta (100µm-5mm) arasında değişmektedir. Bu renk mermerlerin en tipik özelliği gri renkli damarlar içermesidir. Damar genişlikleri 0.05-0.1 cm arasında değişmekte olup, birbirine paralel ve/veya düzensiz yapı gösterirler (Şekil 4.2.a, b).

Gri renkli mermerler çoğunlukla taban döşemelerinde kullanılmıştır (Şekil 4.2.c). Gri renkli mermerleri oluşturan bileşenler çıplak gözle kolaylıkla görülmekte olup, kristal boyutları genellikle ince-orta (100µm-5mm) arasında değişmektedir. Bazı yer döşemesi örnekleri bileşenlerinde tipik olarak yönlenme görülmektedir (Şekil 4.2.d).



Şekil 4.2: Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan a, b) beyaz renkli gri damarlı mermer örnekleri; c, d) gri renkli mermer örnekleri

4.2 Laodikeia Tapınak-A Yapısında Kullanılan Mermerlerin Mikroskop Özellikleri

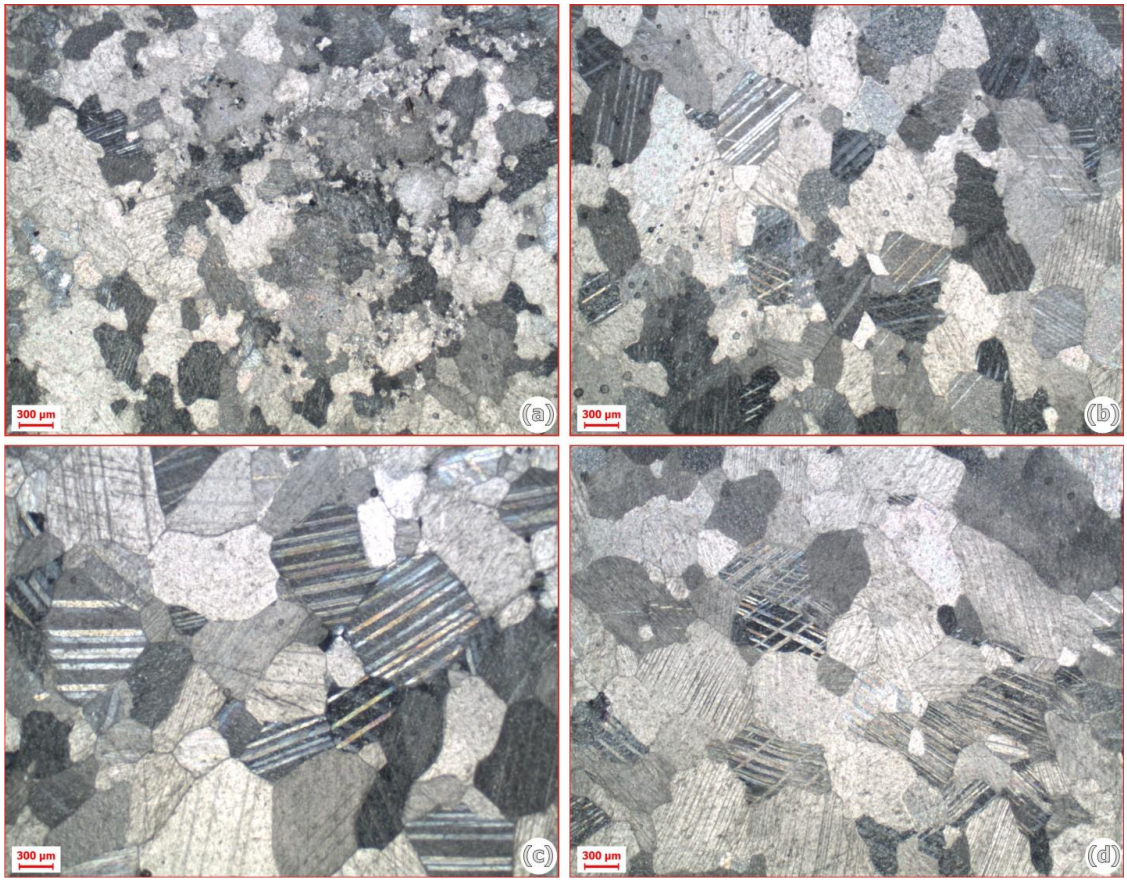
Tapınak-A yapısında kullanılan mermer blokların mineralojik bileşimi ve petrografik (kristal şekli, kristal sınır ilişkileri ve MGS) özelliklerini belirlemek amacıyla ince kesit çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla makro özelliklerine göre dört farklı gruba ayrılan mermer bloklarından alınan 40 adet örnek üzerinde petrografik incelemeler için ince kesitler hazırlanmıştır.

Beyaz renkli lila-mor damarlı mermerler üzerinde yapılan mikroskobik incelemelerde, örneklerin heteroblastik mozaik dokuda oldukları ve karbonat minerallerinden (kalsit, dolomit) oluştukları belirlenmiştir (Şekil 4.3.a, b). Sadece LD-30 numaralı örnekte karbonat mineralleri ile birlikte diyopsit minerali de görülmüştür. Örnekleri oluşturan karbonat mineralleri baskın olarak kalsit bileşiminde olup, daha az oranda dolomit minerallerinden oluşmaktadır. Karbonat

mineralleri çoğunlukla yarı özşekilli-özşekilsiz kristaller halinde olup, kristal boyutları 58-2035 µm arasındadır. İri kristallerde rombohedral dilinim izleri belirgin olup, dilinim açısı 38º-54º arasında değişmektedir. Ayrıca iri kristallerde polisentetik ikizlenmeler yaygın olup, deformasyon sonucunda kink-bant oluşumları gelişmiştir (Şekil 4.3.b).

Beyaz renkli mermer örnekleri çoğunlukla homoblastik poligonal dokuda olup, karbonat minerallerinden (kalsit, dolomit) oluşmaktadır (Şekil 4.3.c, d). Örnekleri oluşturan karbonat mineralleri baskın olarak kalsit bileşimindedir. Kalsit mineralleri çoğunlukla özşekilli-yarı özşekilli kristaller halinde olup, kristal boyutları 112-4090 µm arasında değişmektedir. Kalsit kristallerinde rombohedral dilinim izleri belirgin olup, dilinim açısı 39º-56º arasındadır. İri kalsit kristallerinin birçoğunda polisentetik ikizlenmeler, bazılarında kink-bant oluşumları görülmektedir (Şekil 4.3.d).

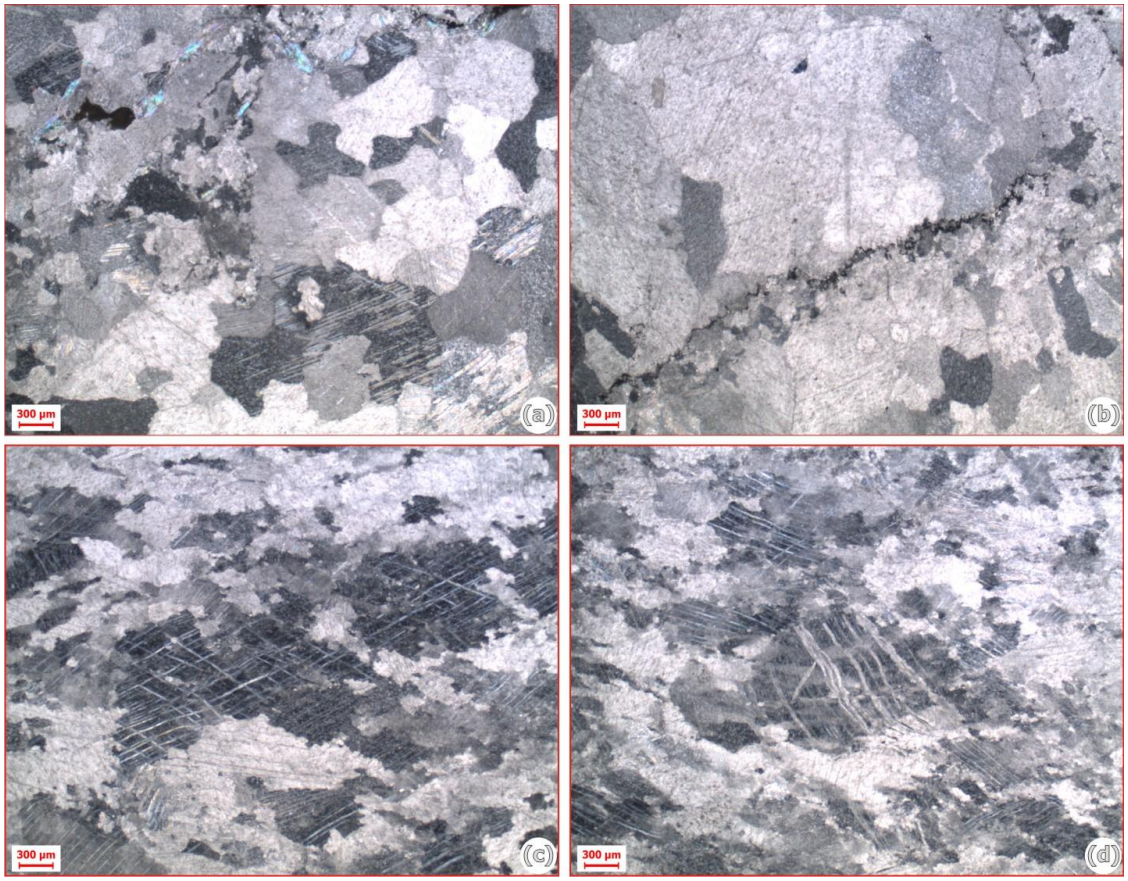
Beyaz renkli gri damarlı mermer örnekleri heteroblastik mozaik dokuda olup, karbonat mineralleri (kasit, dolomit), daha az oranda kuvars, muskovit ve opak minerallerden oluşmaktadır (Şekil 4.4.a, b). Karbonat mineralleri baskın olarak kalsit, daha az oranda dolomit bileşimlidir. Karbonat mineralleri çoğunlukla yarı özşekilli-özşekilsiz kristaller halinde olup, kristal boyutları 60-3365 µm arasında değişmektedir. İri karbonat minerallerinde rombohedral dilinim izleri belirgin olup, dilinim açısı 38º-61º arasındadır (Şekil 4.4.a). Karbonat minerallerinde polisentetik ikizlenmeler ve kink-bant oluşumları görülmektedir. Beyaz renkli gri damarlı mermerlerin en tipik özelliği stilolit yapılarının varlığıdır. Stilolit yapıları boyunca opak mineral ve muskovit oluşumları gözlenmektedir (Şekil 4.4.a, b).



Şekil 4.3: Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan lila-mor damarlı ve beyaz renkli mermerler örneklerinin mikroskop görüntüleri a) beyaz renkli lila-mor damarlı mermer örneklerinde gözlenen heteroblastik mozaik doku b) beyaz renkli lila-mor damarlı mermer örneklerini oluşturan iri kalsit kristallerinde gözlenen polisentetik ikizlenmeler ve dilinimler c) beyaz renkli mermer örneklerinde gözlenen homoblastik poligonal doku d) beyaz renkli mermerleri oluşturan karbonat minerallerinde görülen polisentetik ikizlenmeler ve kink-bant yapıları

Gri renkli mermer örnekleri çoğunlukla heteroblastik mozaik dokuda olup, egemen olarak karbonat mineralleri (kalsit, dolomit) ve daha az miktarda kuvars minerallerinden oluşmaktadır (Şekil 4.4.c, d). İncelenen örneklerden LD-31 numaralı örnekte karbonat mineralleri ile birlikte zirkon, LD-34 numaralı örnekte ise piroksen minerali görülmüştür. Gri renkli mermerleri oluşturan bileşenler tipik olarak yönlenme göstermektedir (Şekil 4.4.c). Örnekleri oluşturan karbonat mineralleri baskın olarak kalsit bileşiminde olup, çoğunlukla özşekilsiz kristaller halinde görülmektedir. Kalsit kristal boyutları 68-3448 µm arasında değişmektedir. İri kristallerde rombohedral dilinim izleri belirgin olup, dilinim açısı 33º-59º arasındadır. Ayrıca iri kalsit kristallerinin birçoğunda polisentetik ikizlenmeler,

bazılarında kink-bant oluşumları görülmektedir (Şekil 4.4.d). Kuvars mineralleri incelenen bazı ince kesitler içersinde yuvarlaklaşmış tekil kristaller halinde ve dağınık olarak görülmektedir.



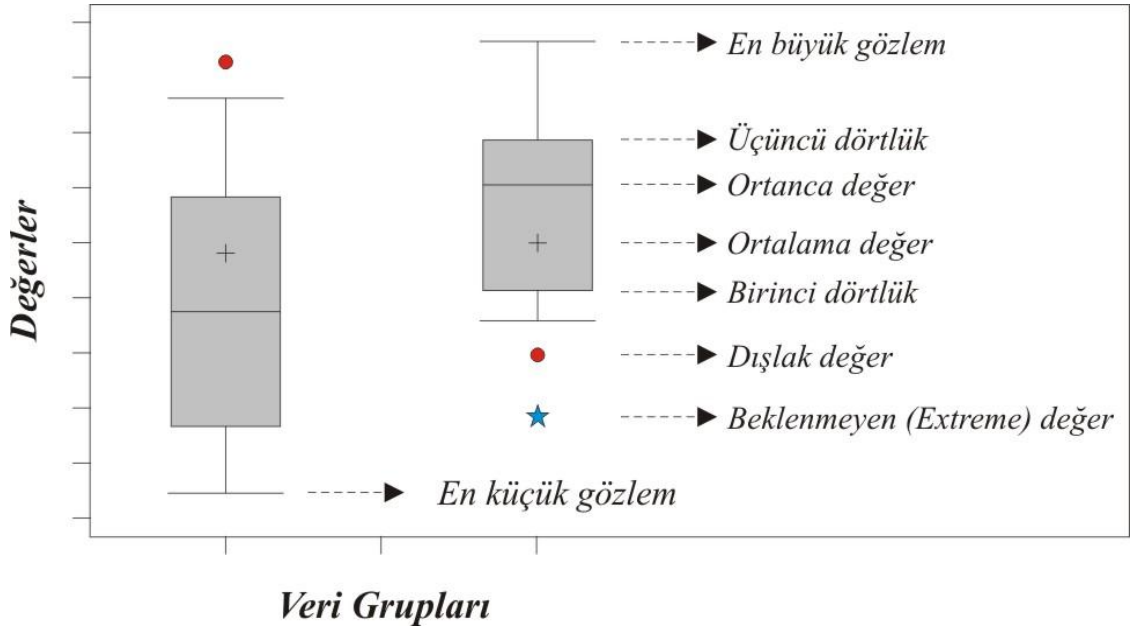
Şekil 4.4: Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan gri damarlı ve gri renkli mermerler örneklerinin mikroskop görüntüleri a) beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinde gözlenen heteroblastik mozaik doku ve muskovit pulcukları, b) beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinde gözlenen stilolit yapıları ve bu yapılar boyunca gözlenen opak mineral oluşumları, c) gri renkli mermer örneklerindeki heteroblastik mozaik doku ve karbonat minerallerinde görülen yönlenmeler, d) gri renkli mermer örneklerini oluşturan karbonat minerallerinde gelişmiş kink-bant oluşumları

4.2.1 Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan mermerlerin maksimum tane boyu (Maximum Grain Size-MGS) ölçümleri

Mermerler üzerinde gerçekleştirilen petrografik incelemelerde (tane sınır şekli (Grain Boundary Shape-GBS) ve MGS vb.) etkin olan metamorfik süreçlerin anlaşılması bakımından önemlidir (Heinrich, 1956; Best, 1982; Gorgoni ve diğ., 2002).

MGS parametresi ilk kez Moens ve diğ. (1988) tarafından mermerleri tanımlama ve sınıflandırma açısından yararlı bir yöntem olarak tanımlanmıştır. MGS metamorfizma sürecinde mermerler tarafından ulaşılmış maksimum sıcaklıkla ve basınç ile ilişkilendirilen önemli bir teşhis parametresidir. Gerçekte, oldukça yüksek basınç (Ultra High Pressure-UHP) eklojit ve granülit fasiyesi koşullarında oluşmuş mermerler yüksek MGS (>3 mm) değerleriyle karakterize edilirken diğer bütün mermerler ince ve orta tane boyutlarına (<2 mm) sahiptir ve düşük dereceli metamorfizma koşullarını yansıtmaktadır (Borghi ve diğ., 2009). Antik dönemde kullanılan mermer türlerinin tanımlanması ve kaynak alanlarının belirlenmesi çalışmaları için önemli bir petrografik özellik olan MGS ölçümleri diğer parametrelerle (kimyasal analizler, duraylı izotop analizleri, EPR gibi) birlikte değerlendirildiğinde mermer türleri ve ocaklarının ayrımında oldukça kullanışlıdır (Mandi ve diğ., 1992; Gorgoni ve diğ., 2002; Polikreti ve Maniatis, 2002).

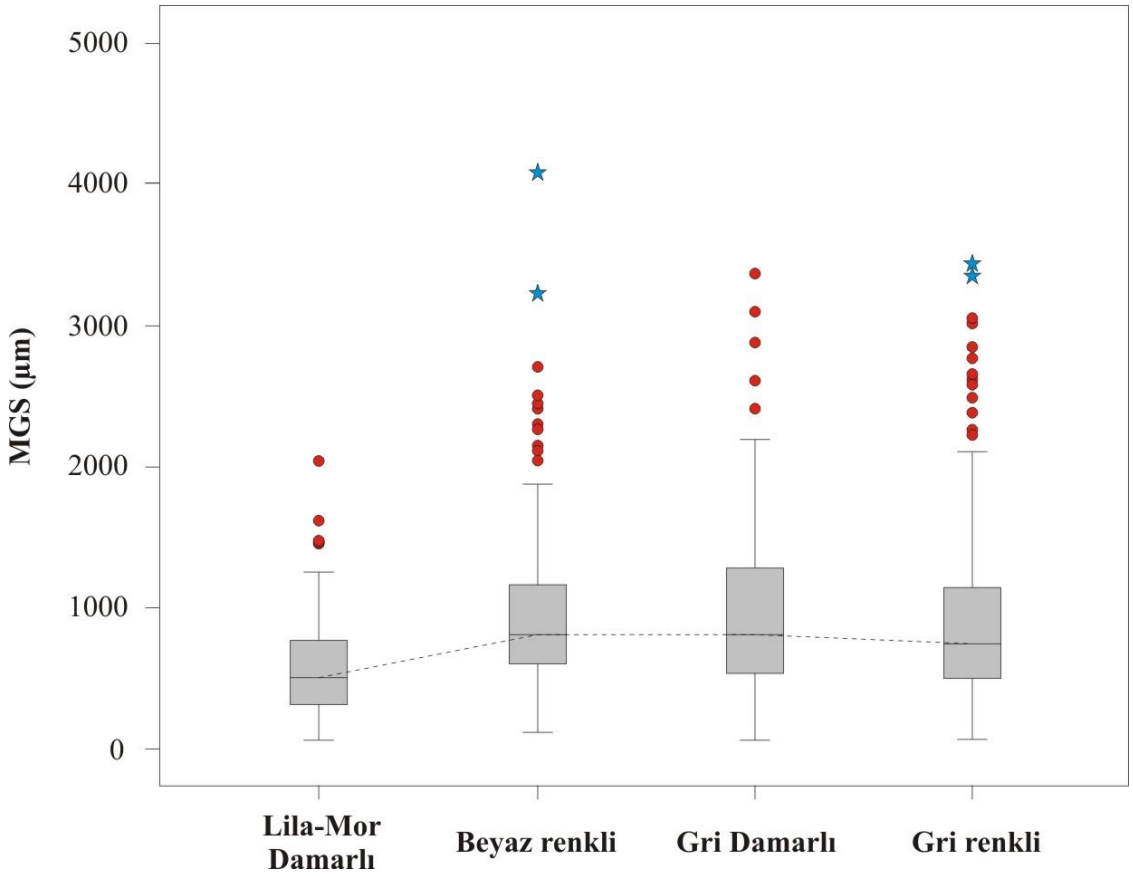
MGS ölçümleri mikroskop altında karbonat minerallerinin (çoğunlukla iri taneli kalsit) uzun ekseni boyunca gerçekleştirilmiştir. Birçok makalede MGS ölçüm sonuçları kutu grafiği (Box plot) şeklinde gösterilmiştir. Kutu grafikleri istatistiksel grafik aleti olup, niceliksel verileri görsel şekilde özetlemek için ilk defa Amerikan istatistikçi John Tukey tarafından 1977 yılında *kutu ve bıyıklar grafiği* adı altında açıklayıcı veri analiz aracı olarak geliştirilmiştir. İstatistik biliminde kutu grafikleri sayısal veri setlerini beş sayı özetlerine (en küçük gözlem, birinci dörtlük (kartil), medyan, üçüncü dörtlük ve en büyük gözlem değerlerine) dayanarak resmeden uygun betimleme yoludur (Şekil 4.5). Kutu ve bıyık grafikleri, veri setinin yayılımı, konumu, çarpıklığı, kuyruk uzunlukları, aykırı gözlem değerleri hakkında bilgi verir (http://tr.wikipedia.org/wiki/Kutu_grafiği; Özdamar, 2004; Akgül ve Çevik, 2005).



Şekil 4.5: Kutu grafiği ve taşıdığı özellikler

Laodikeia mermer örnekleri üzerinde gerçekleştirilen MGS ölçüm sonuçlarına ait kutu grafiği şekil 4.6' da verilmiştir. Grafiği incelediğimizde dört farklı mermer grubunun ortanca değerlerinin birbirine yakın değerler olduğu, bununla birlikte mermer gruplarının oldukça fazla miktarda dışlak değerlere sahip oldukları görülmektedir. Bu durum petrografik incelemeler kısmında verilen mermer örneklerinin dokusal özellikleri (heteroblastik doku) ile uyuşmaktadır.

Tablo 4.1' de mermer gruplarına ait MGS ölçüm sonuçları verilmektedir. Buna göre beyaz renkli mermer örneklerinin karbonat minerallerinin tane boyutu diğer gruplara göre daha büyüktür. Ölçümlerde standart sapma değerlerinin yüksek olması örneğin metamorfizma geçmişi ile ilişkilendirilebilir. Bu anlamda metamorfizmadan fazlaca etkilenmiş, farklı metamorfizma süreçlerine maruz kalmış mermer örneklerinde bu değerin yüksek olması beklenir (Hinterlechner-Ravnik, 1971; Hinterlechner-Ravnik ve Moine, 1977; Jarc ve diğ., 2010). Tablo 4.1'e göre standart sapma miktarı gri renkli mermer örneklerinde en fazladır. Petrografik incelemelerde gri renkli mermer örneklerinin belirgin mineral yönlenmesi göstermesi ve karbonat minerallerinde yaygın olarak görülen kink-bant yapıları gri renkli mermerlerin metamorfizmadan fazlaca etkilenmiş olduğunu destekleyen bulgulardır.



Şekil 4.6: Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan mermer türlerinin MGS ölçümlerini gösteren kutu grafikleri

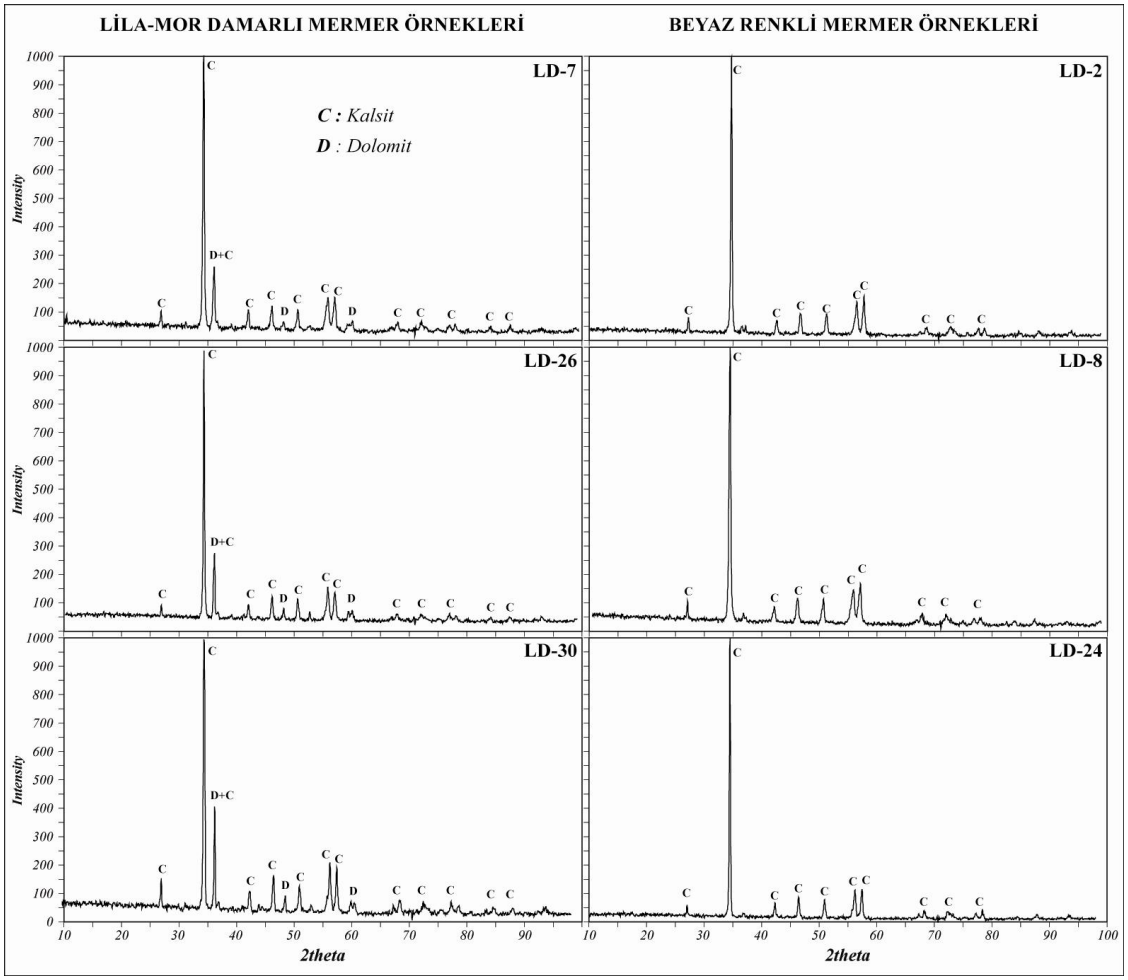
Tablo 4.1: Laodikeia mermer türlerine ait MGS ölçüm sonuçları

Mermer Türü	Tane Boyutu (µm)			
	Minimum	**Maksimum**	**Ortanca**	**Standart sapma**
Lila-mor damarlı	58,47	2035,82	509,72	331,77
Beyaz renkli	112,08	4090,95	809,77	565,96
Gri damarlı	60,74	3365,40	816,06	600,45
Gri renkli	68,74	3448,31	744,24	632,53

4.3 Laodikeia Tapınak-A Yapısında Kullanılan Mermerlerin XRD İncelemeleri

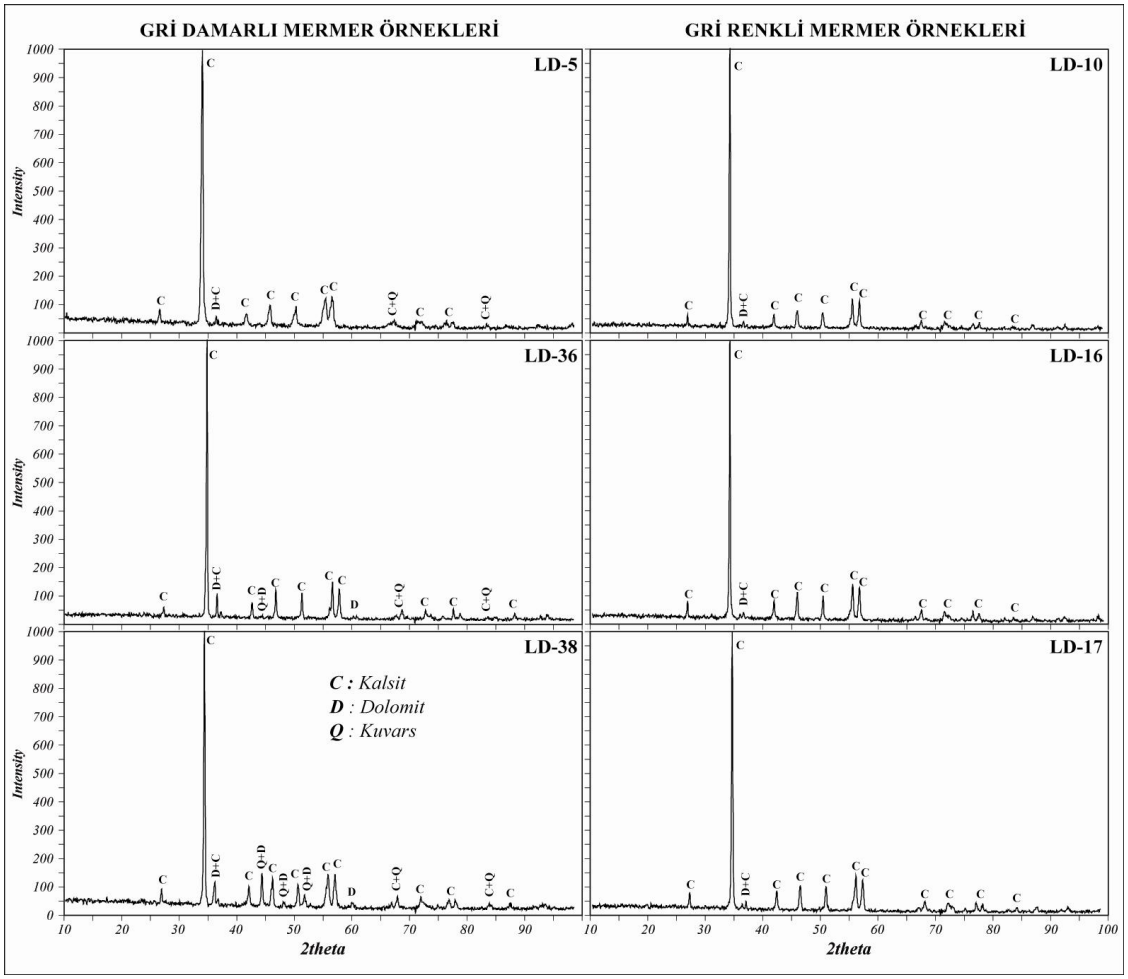
Optik mikroskop çalışmaları ile türü belirlenemeyen karbonat minerallerini (kalsit, dolomit) tanımlamak ve mermer örnekleri içerisindeki farklı bileşenleri belirleyebilmek için farklı renk ve doku özelliği gösteren 24 adet mermer örneği üzerinde XRD çalışmaları yapılmıştır.

Tüm kayaç toz XRD sonuçlarına göre; beyaz renkli lila-mor damarlı mermer örneklerinde kalsit ve dolomit, beyaz renkli mermer örneklerinde kalsit (Şekil 4.7), gri damarlı mermer örneklerinde kalsit, dolomit ve kuvars, gri renkli mermer örneklerinde kalsit ve dolomit piklerinin varlığı tespit edilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.7: Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan beyaz renkli lila-mor damarlı ve beyaz renkli bazı mermer örneklerine ait XRD grafikleri

Beyaz renkli lila-mor damarlı mermer örneklerinde görülen dolomit pikleri oldukça belirgin olup, gri damarlı ve gri renkli mermer örneklerinde görülen dolomit pikleri baskın değildir.



Şekil 4.8: Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli bazı mermer örneklerine ait XRD grafikleri

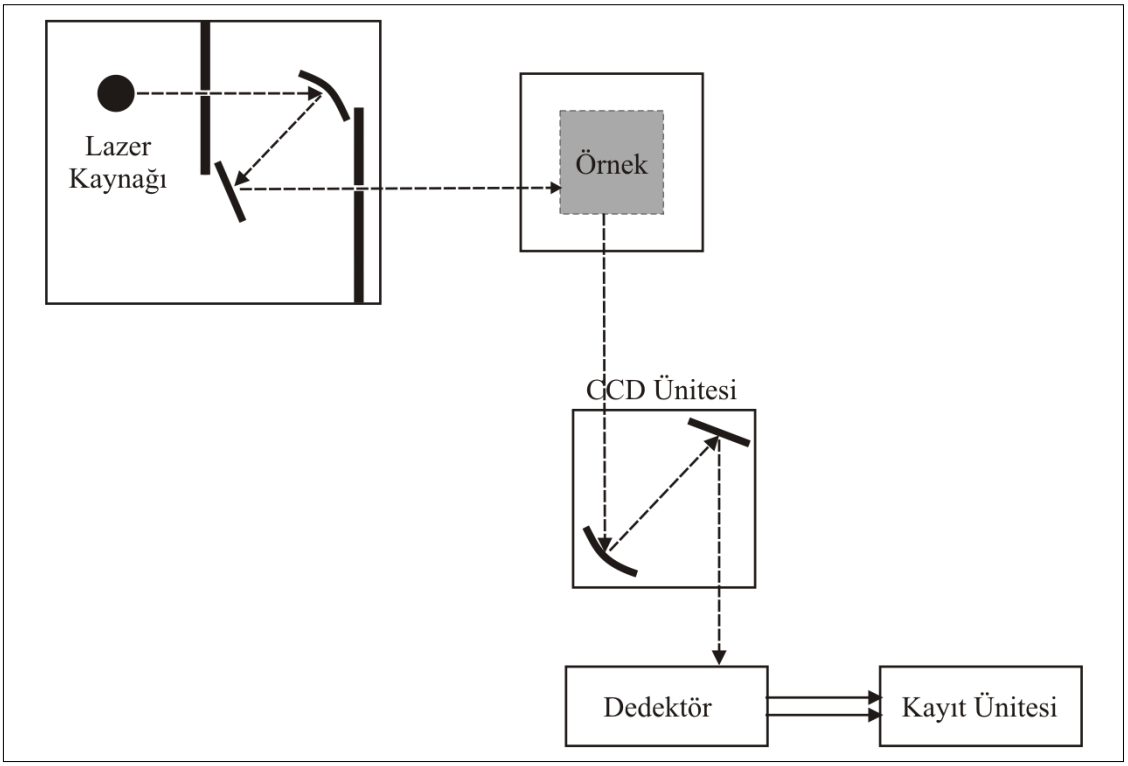
4.4. Konfokal Raman Spektroskopi (Confocal Raman Spectroscopy-CRS) İncelemeleri

4.4.1 CRS teorisi

Moleküllerin şiddetli bir monokromatik ışın demeti ile etkileşmesi sırasında ışık absorpsiyonu olayı gerçekleşmiyorsa ışık saçılması olayı meydana gelir. Işın geçirgen ortamdan geçerken ortamdaki türler, ışın demetinin bir kısmını çeşitli yönlere doğru saçarlar. 1928'de, Hintli Fizikçi C.V. Raman, belirli moleküllerce saçılan ışının ufak bir kesrinin görünür alandaki dalga boyunun gelen ışığınkinden

farklı olduğunu ve buna ilaveten dalga boyundaki kaymaların, saçılmadan sorumlu moleküllerin kimyasal yapısına bağımlı olduğunu bulmuştur (Griffith, 1975; Gündüz, 1999). Işık saçılması sırasında saçılan ışığın büyük bir kısmının enerjisi madde ile etkileşen ışığın enerjisine eşit olur ve bu tür elastik saçılma olayına *Rayleigh saçılması* denir. Elastik saçılma olayının yanı sıra saçılan ışığın çok az bir kısmı ise molekül ile etkileşmeye giren ışığın enerjisinden daha farklı enerjilerle saçılır. Bu tür elastik olmayan saçılma olayı ise *Raman saçılması* adını alır. Raman saçılmaları, bir numuneyi görünür (400 ~ 700 nm) alan veya yakın-infrared monokromatik ışından oluşan, güçlü bir lazer kaynağıyla ışınlama yoluyla elde edilir. Raman saçılmasının spektroskopik incelenmesi ile de moleküllerin titreşim enerji düzeyleri hakkında bilgi edinilebilir. Bu tür bir spektroskopik yöntem *Raman spektroskopisi (CRS)* olarak bilinmektedir. Raman spektroskopisinde molekül ile etkileşen ışığın dalga boyuna göre saçılan ışığın dalga boyunda oluşan farklar ölçülür. Ölçüm sonucu elde edilen normal Raman piklerinin şiddeti veya gücü, molekülün polarizlenebilirliğine, ışın kaynağının şiddetine, ölçüm yapılan maddenin bileşimine ve bir dizi diğer faktöre karmaşık şekilde bağlıdır (Mayo ve diğ., 2004; McMillan, 1989).

Modern bir Raman spektrometresi 3 ana bileşenden oluşmaktadır (Şekil 4.9). Bir ışın kaynağı, bir numune aydınlatma sistemi ve uygun bir spektrometre (CCD ünitesi). Bu bileşenlerin performans özellikleri diğer spektrometrelerdekinden daha önemlidir ve çok daha iyi olmalıdır. Çünkü Raman saçılım sinyali Rayleigh saçılımından oluşan sinyale göre daha zayıftır.



Şekil 4.9: CRS' nin ana bileşenleri (Koralay 2006' dan alınmıştır)

Modern Raman spektrometrelerinde geleneksel monokromatik ışın kaynağının yerini lazer ışın kaynakları almıştır (Tablo 4.2). Lazer ışık kaynağının en önemli avantajları yoğun, polarize, kararlı ve tek renkli olmasıdır. Raman spektroskopisinde genel amaçlı çalışmalar için kullanılan lazer ışık kaynağının gücü 40-500 mW (mikro watt) arasında değişmektedir. Raman spektrometrelerinde numune aydınlatma sistemi olarak petrografik amaçlı bir mikroskop kullanılmaktadır.

Tablo 4.2: CRS' de yaygın olarak kullanılan lazer kaynakları

Lazer Kaynağın Türü	**Dalga Boyu (nm)**
Argon iyonu	488 veya 514.5
Kripton iyonu	530.9 veya 647.3
Helyum/Neon	632.8
Diyod Lazeri	782 veya 830
Nd/YAG	1064

Daha çok nitel analiz yapılan Raman spektroskopisi yönteminin en önemli iki avantajı; incelenecek madde üzerinde herhangi bir bozucu etkisinin olmaması ve incelemelerde kullanılacak örnekler için herhangi bir örnek hazırlama gerektirmemesidir. Bu iki önemli özellik raman spektroskopisinin katı, toz ve sıvı örnekler üzerinde kolaylıkla uygulanabilirliğini sağlamaktadır. Raman spektroskopisi inorganik (kristal ve mineraller), organik ve biyolojik sistemlerin kalitatif ve kantitatif analizlerinde kullanılmaktadır. Kristal ve minerallerin incelenmesinde spektroskopinin kullanımı açısından Raman tekniği çoğu kez infrarede göre üstündür. Özellikle atomlar arasındaki metallik bağlarının titreşim enerjileri 100-700 cm^{-1} aralığında yer alır. Raman çalışmaları minerallerin bileşim, yapısına ilişkin bilgilerin elde edilmesinde yararlı kaynaklardır (http://www.bayar.edu.tr/besergil/raman_spektroskopisi.pdf;http://www.horiba.com/ scientific/products/ramanspectroscopy/applications; Koralay, 2006; Koralay ve Kadıoğlu, 2008; Koralay ve diğ., 2013)

4.4.2 Tapınak-A yapısı mermer örnekleri CRS çalışmaları

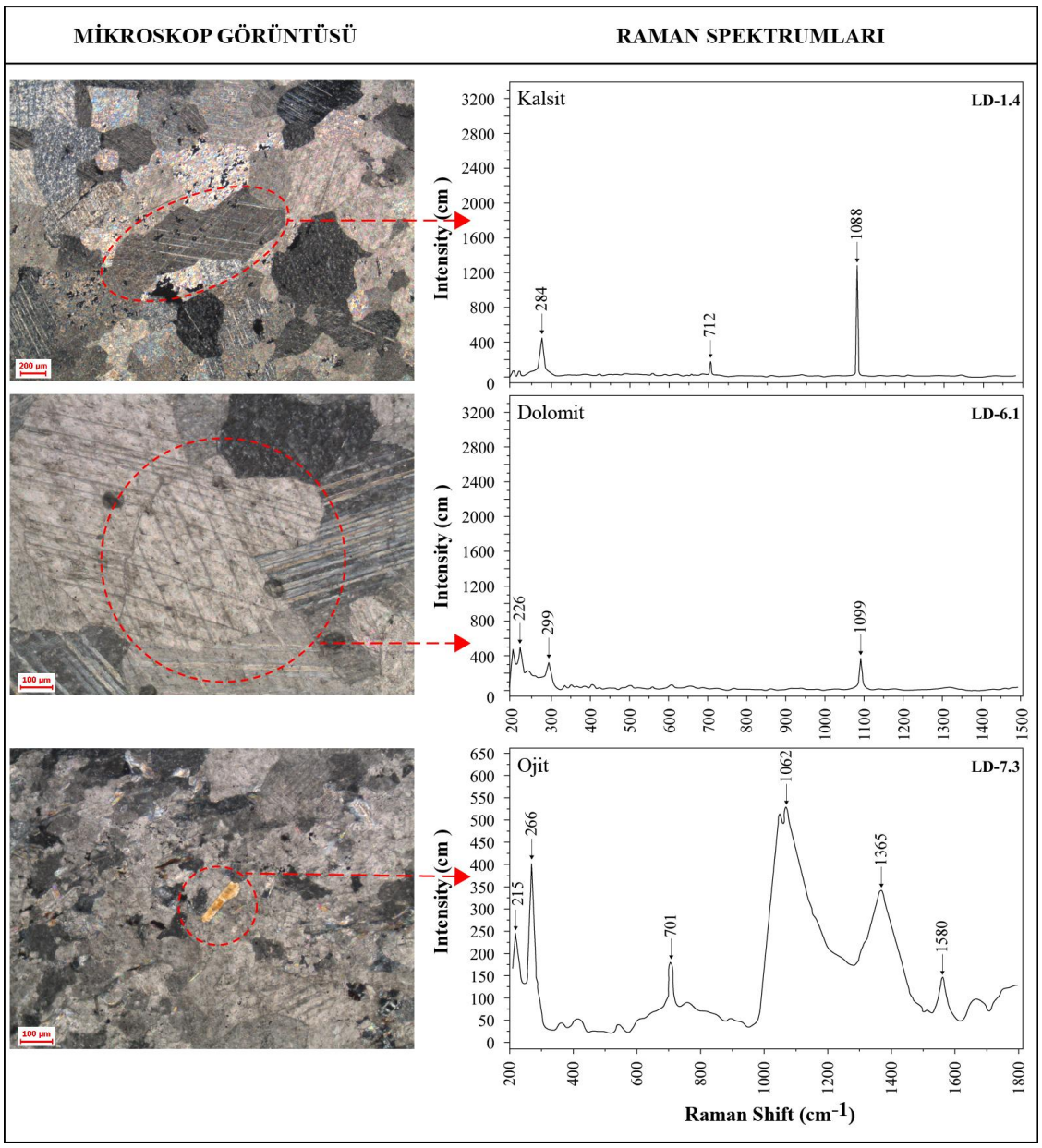
Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan mermer örneklerinin mineral bileşimlerinin belirlenmesi ve mermer örneklerini oluşturan karbonat minerallerinin (kalsit, dolomit) türlerini belirleyebilmek için Raman spektroskopi çalışması yapılmıştır. İncekesit çalışmalarında kalsit ve dolomit minerallerini birbirinden ayıramak çoğunlukla zor bir iştir. Bu ayrımı yapabilmek amacıyla XRD analizi ve/veya Alizarin kırmızısı ile boyama yöntemi sıklıkla kullanılan ayrım yöntemleridir. Ancak her iki yöntemde de örnekler az ya da çok tahribata uğramakta ve örneklerin yapısı bozulabilmektedir. Bu amaçla tahribatsız örnek analizi olarak CRS çalışması yürütülmüştür. CRS incelemeleri sırasında belirlenen minerallerin göstermiş oldukları standart Raman piklerinin sayısal konumları tablo 4.3’ de verilmiştir.

Tablo 4.3: Tapınak-A yapısı mermerlerini oluşturan bazı minerallerin standart Raman piklerinin sayısal konumları

	Kalsit[1]	**Dolomit**[1]	**Kuvars**[2]	**Ojit**[3]
Maksimum pik konumları (cm^{-1})	89	-		
	162	187	128	
	288		206, 265	
		309	355, 394	323, 352, 387
			401, 450, 465	461
			511	508,531, 556
			696	662
	716	733	796	769
			808	862
	1092	1106	1069, 1085	1007, 1038
			1162	
			1230	
	1437	1450		
	1754	1765		

[1]Gunasekaran ve diğ. 2006; [2]Kingma ve Hemley 1994; [3]Buzatu ve Buzgar 2010

Tapınak-A yapısında kullanılan beyaz renkli lila-mor damarlı mermer örnekleri içerisinde başlıca kalsit, dolomit ve ojit türü mineral pikleri belirlenmiştir. Kalsit bileşimli mineralin en belirgin Raman pikleri 284, 712 ve 1084 (cm^{-1})'de görülmüştür (Şekil 4.10). Kalsit mineralinin en küçük Raman piki 284 (cm^{-1})' de olup, molekül kafesinde ötelenme salınımları (translatory oscillation) içeren CO_3 molekülünün dış titreşimleriyle ilişkilidir. 712 (cm^{-1})' de görülen pik, CO_3 molekülünün simetrik deformasyonu ile ilişkili olup, 1084 (cm^{-1})' de görülen pik, CO_3 molekülünün simetrik gerilmesinden kaynaklanmaktadır (Gunasekaran ve diğ., 2006; Buzgar ve Apopei, 2009).

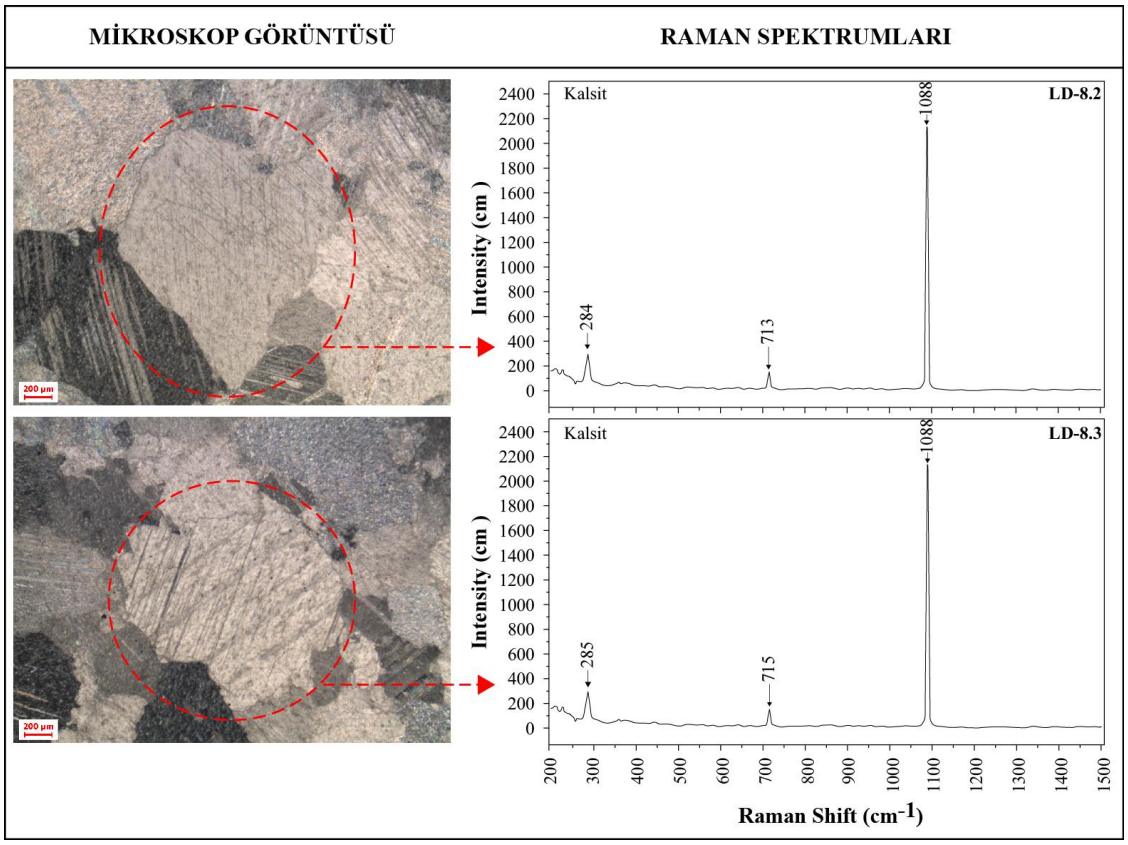


Şekil 4.10: Tapınak-A yapısı beyaz renkli lila-mor damarlı mermer örneklerinde görülen mineral türlerine ait Raman spektrumları

Dolomit bileşimli mineralin raman pikleri 226, 299 ve 1099 (cm^{-1})'de görülmektedir (Şekil 4.10). Dolomit mineralinin en küçük Raman piki 226 (cm^{-1})' de bulunmaktadır. 299 (cm^{-1})' de görülen pik, dolomitin kimyasal formülünde bulunan katyon ve anyonlar arasındaki bağlardaki deformasyonla ilişkilidir. 1099 (cm^{-1})' de görülen pik, CO_3 molekülünün simetrik gerilmesinden kaynaklanmaktadır (Gunasekaran ve diğ., 2006).

Ojit mineralinin pik değerleri 215, 266, 701, 1062, 1365, 1580 (cm^{-1})'de görülmektedir (Şekil 4.10). 215 ve 266 (cm^{-1}) de görülen pikler ojitin kimyasal bileşiminde bulunan katyonlar ile oksijen arasındaki gerilmelerden kaynaklanırken, 701 (cm^{-1})' de bulunan pik Si-O atomları arasındaki bağın titreşimi ile ilişkilidir. 1062, 1365, 1580 (cm^{-1})' de görülen raman pikleri birbirinden bağımsız tetraeder yapılarındaki Si-O arası bağlarda oluşan gerilme ile ilşkilidir (Buzatu ve Buzgar, 2010).

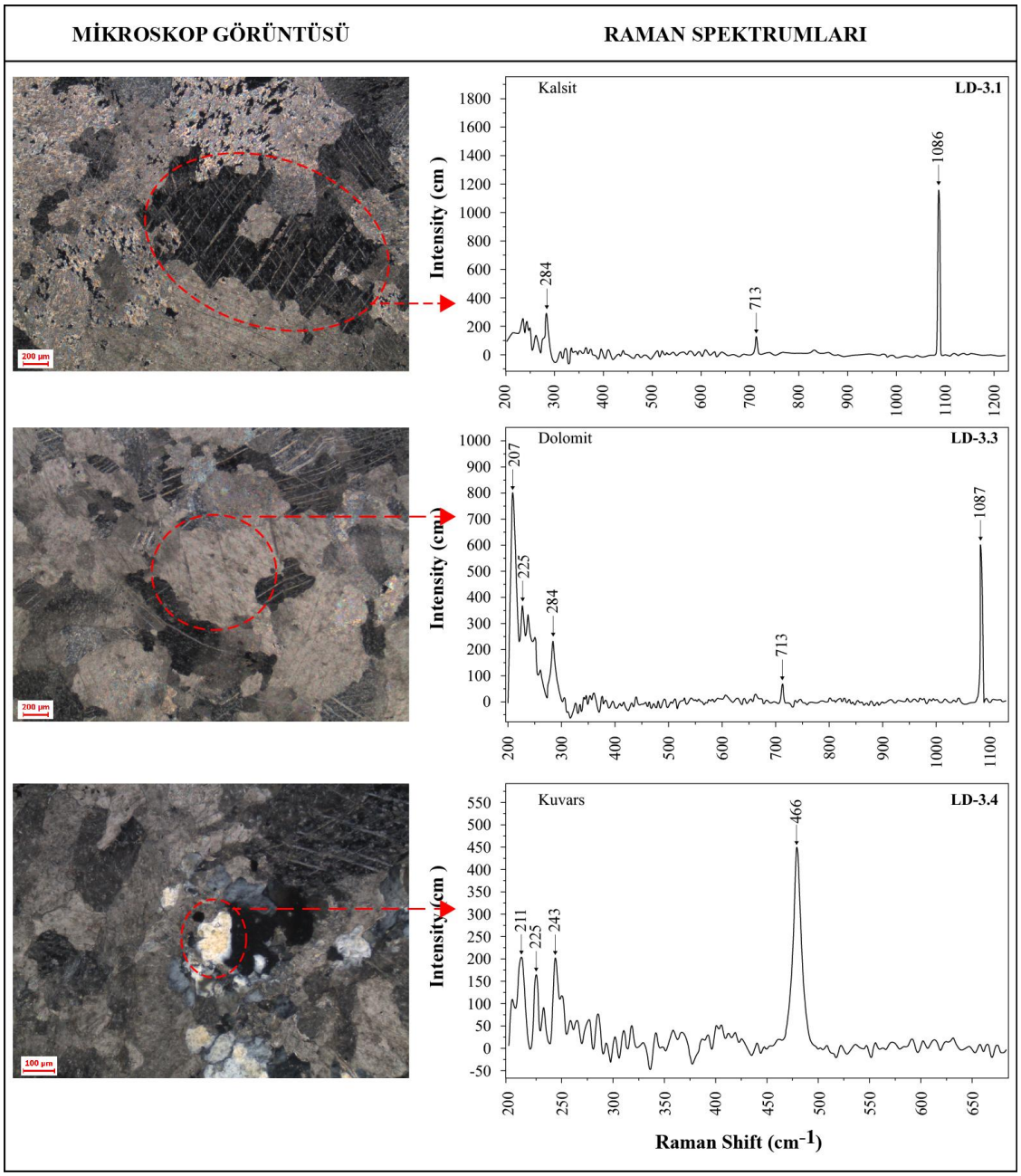
Tapınak-A yapısında kullanılan beyaz renkli mermer örneklerinin CRS incelemelerinde başlıca kalsit türü mineral pikleri belirlenmiştir. Beyaz renkli mermer örnekleri en belirgin Raman pikleri 284-285, 713-715 ve 1088 (cm^{-1})'de görülen kalsit minerallerinden oluşmaktadır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11: Tapınak-A yapısı beyaz renkli mermer örneklerinde görülen mineral türlerine ait Raman spektrumları

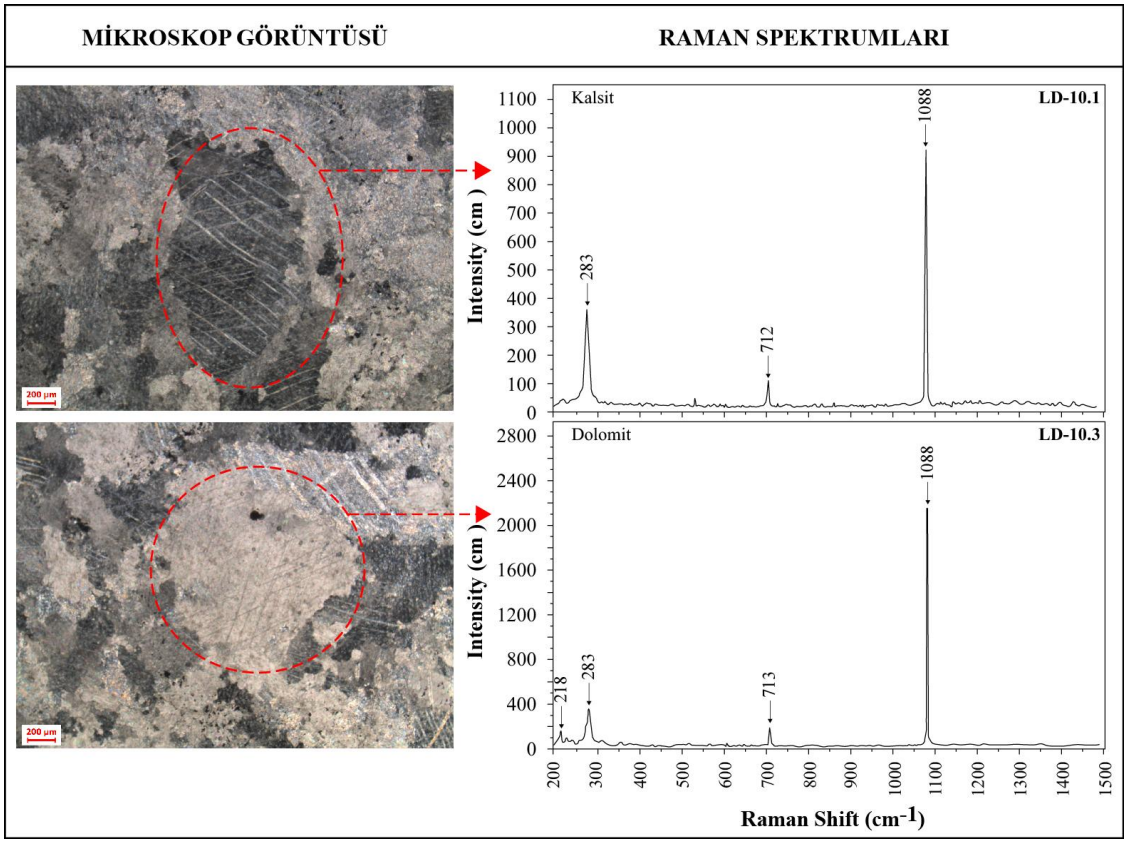
Beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin CRS incelemelerinde başlıca kalsit, dolomit ve kuvars türü mineral pikleri belirlenmiştir. Kalsit mineralinin Raman pikleri 284, 713 ve 1086 (cm^{-1})'de, dolomit mineralinin Raman pikleri 207, 225, 284, 713 ve 1087 (cm^{-1}) ve kuvars mineralinin Raman pikleri 211, 225, 243 ve 466 (cm^{-1})

de görülmektedir (Şekil 4.12). Silis minerallerinin CRS incelemelerinde 400 (cm^{-1}) altında kalan pikler Si-O atomları arasındaki burulma titreşimleri ile ilişkilendirilirken, 400-530 (cm^{-1}) arasında görülen pikler Si-O-Si arasındaki simetrik gerilmelerden kaynaklanmaktadır (Kingma ve Hemley, 1994).



Şekil 4.12: Tapınak-A yapısı beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinde görülen mineral türlerine ait Raman spektrumları

Gri renkli mermer örnekleri içerisinde başlıca kalsit ve dolomit türü mineral pikleri belirlenmiştir. Kalsit mineralinin Raman pikleri 283, 712 ve 1088 (cm^{-1})'de, dolomit mineralinin Raman pikleri 218, 283, 713 ve 1088 (cm^{-1}) görülmektedir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13: Tapınak-A yapısı gri renkli mermer örneklerinde görülen mineral türlerine ait Raman spektrumları

Tapınak-A yapısında kullanılan mermer türlerinin CRS incelemelerinde benzer mineral piklerinin varlığı belirlenmiştir. Özellikle kalsit ve dolomit piklerinin birbirine çok yakın değerlerde olması bu iki mineral arasında ayrım yapabilmeyi zorlaştırmaktadır. Bunun en önemli nedenleri arasında incelenen kalsit ve dolomit minerallerin element bileşimlerinin bilinmemesi ve kayaç içerisindeki kalsit minerallerinin dolomite dönüşüm (dolomitleşme) süreçleri gösterilebilir. Bununla birlikte dolomit minerallerine ait Raman spektrumlarının kalsitin Raman spektrumlarına oldukça benzer olmasına dolomit minerallerinin yüksek Ca içeriğinin neden olduğu düşünülmektedir.

4.5 Laodikeia Tapınak-A Yapısında Kullanılan Mermerlerin Jeokimyasal Özellikleri

Petrografik ve XRD çalışmalarında farklılıkları belirlenen mermer örneklerinin jeokimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla ana ve iz element analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarının kutu grafikler kullanılarak yorumlaması yapılmış ve mermer örneklerinin kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Mermer örneklerine ait jeokimyasal analiz sonuçları ek A.1'de verilmiştir.

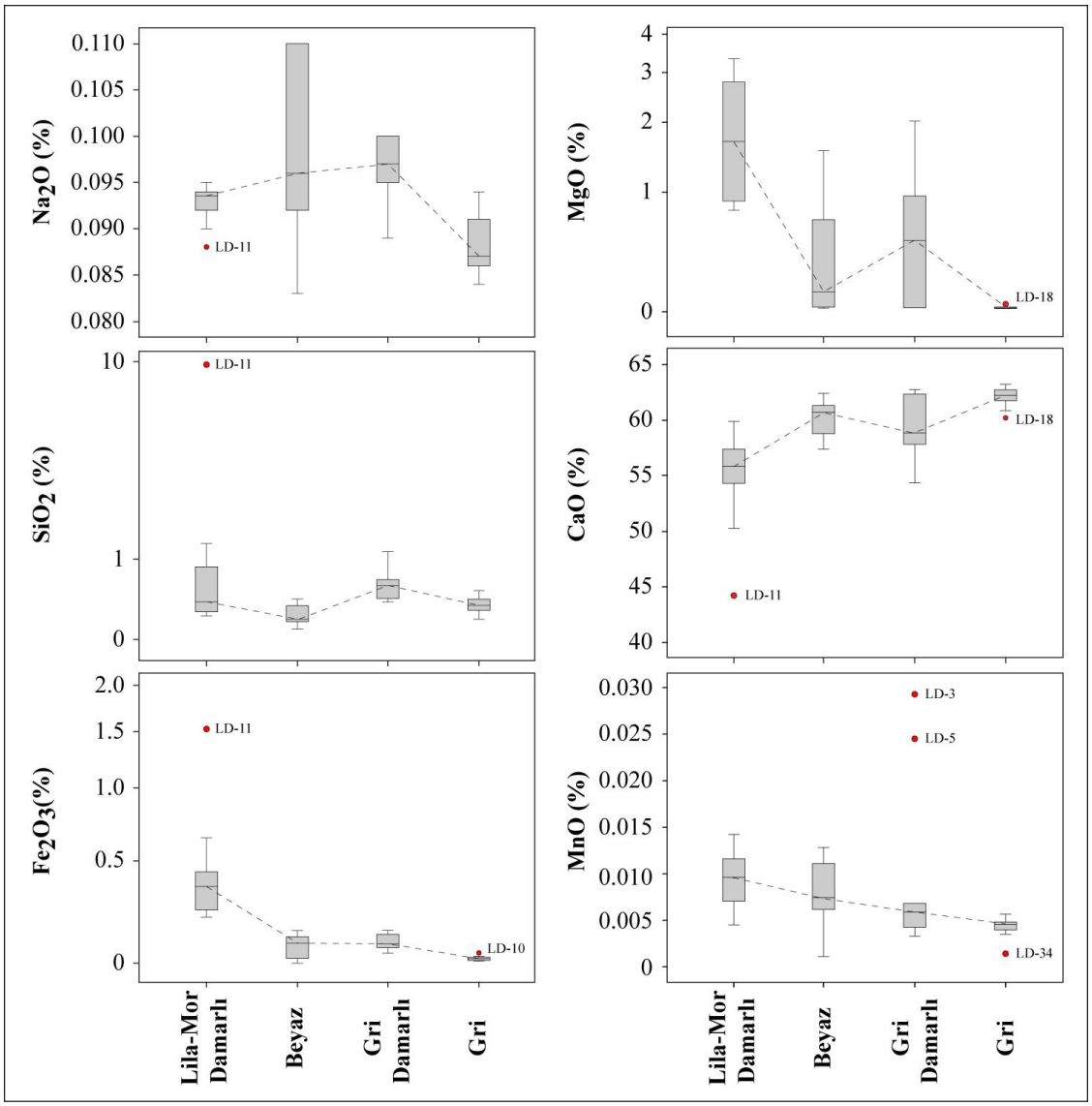
4.5.1 Ana oksit ve iz element özellikleri

Egemen olarak karbonat ($CaCO_3$) minerallerinden oluşan mermer örneklerinin jeokimyasal özelliklerini karşılaştırabilmek amacıyla kutu grafikleri hazırlanmıştır. Laodikeia mermer örnekleri Na_2O (%) içeriği bakımından asimetrik dağılım göstermektedir. Beyaz renkli mermer örneklerinin Na_2O (%) içeriği diğer mermer gruplarına göre daha geniş bir dağılım aralığına sahiptir. Lila-mor damarlı mermer örnekleri içerisinde LD-11 numaralı örnek dışlak değeri oluşturmaktadır (Şekil 4.14).

MgO (%) içerikleri bakımından Laodikeia mermer örneklerinin farklı dağılıma sahip oldukları görülmektedir. Gri renkli mermer örneklerinin MgO (%) içerikleri oldukça sınırlı bir dağılım gösteriyorken, lila-mor damarlı mermer örnekleri simetrik (homojen) bir dağılım göstermektedir (Şekil 4.14). LD-18 (gri renkli) numaralı mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır.

SiO_2 (%) içerikleri bakımından lila-mor damarlı mermer örneklerinin daha geniş dağılım aralığına, beyaz ve gri renkli mermer örneklerinin ise benzer SiO_2 (%) içeriklerine sahip oldukları görülmektedir (Şekil 4.14). LD-11 (Lila-mor damarlı) numaralı mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır.

CaO (%) içerikleri bakımından Laodikeia mermer örnekleri farklı bir dağılıma sahiptir. Lila-mor damarlı mermer gruplarının simetrik (homojen) bir dağılım gösterdiği, gri renkli mermer örneklerinin CaO (%) içeriklerinin diğer mermer gruplarına göre daha dar bir dağılım aralığına sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte LD-11 (lila-mor damarlı) ve LD-18 (gri renkli) numaralı mermer örneklerinin dışlak değerleri oluşturmaktadır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14: Laodikeia mermer örneklerinin bazı ana oksit element içeriklerine ait kutu grafikleri

Lila-mor damarlı mermer örneklerinin Fe_2O_3 (%) içeriği beyaz, gri damarlı ve gri renkli mermer gruplarına göre daha yüksek değerlerdedir. LD-11 (lila-mor damarlı) ve LD-10 (gri renkli) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır (Şekil 4.14).

MnO (%) içeriği lila-mor damarlı ve beyaz renkli mermer gruplarında benzer dağılımlar gösteriyorken, gri damarlı mermerler diğer mermer gruplarına göre daha dar bir dağılım aralığına sahiptir. LD-3, LD-5 (gri damarlı) ve LD-34 (gri renkli) numaralı örneklerin dışlak değerler oldukları görülmektedir (Şekil 4.14). Benzer

şekilde lila-mor damarlı mermer örneklerinden gri renkli mermer örneklerine doğru MnO içeriklerinin azaldığı görülmektedir.

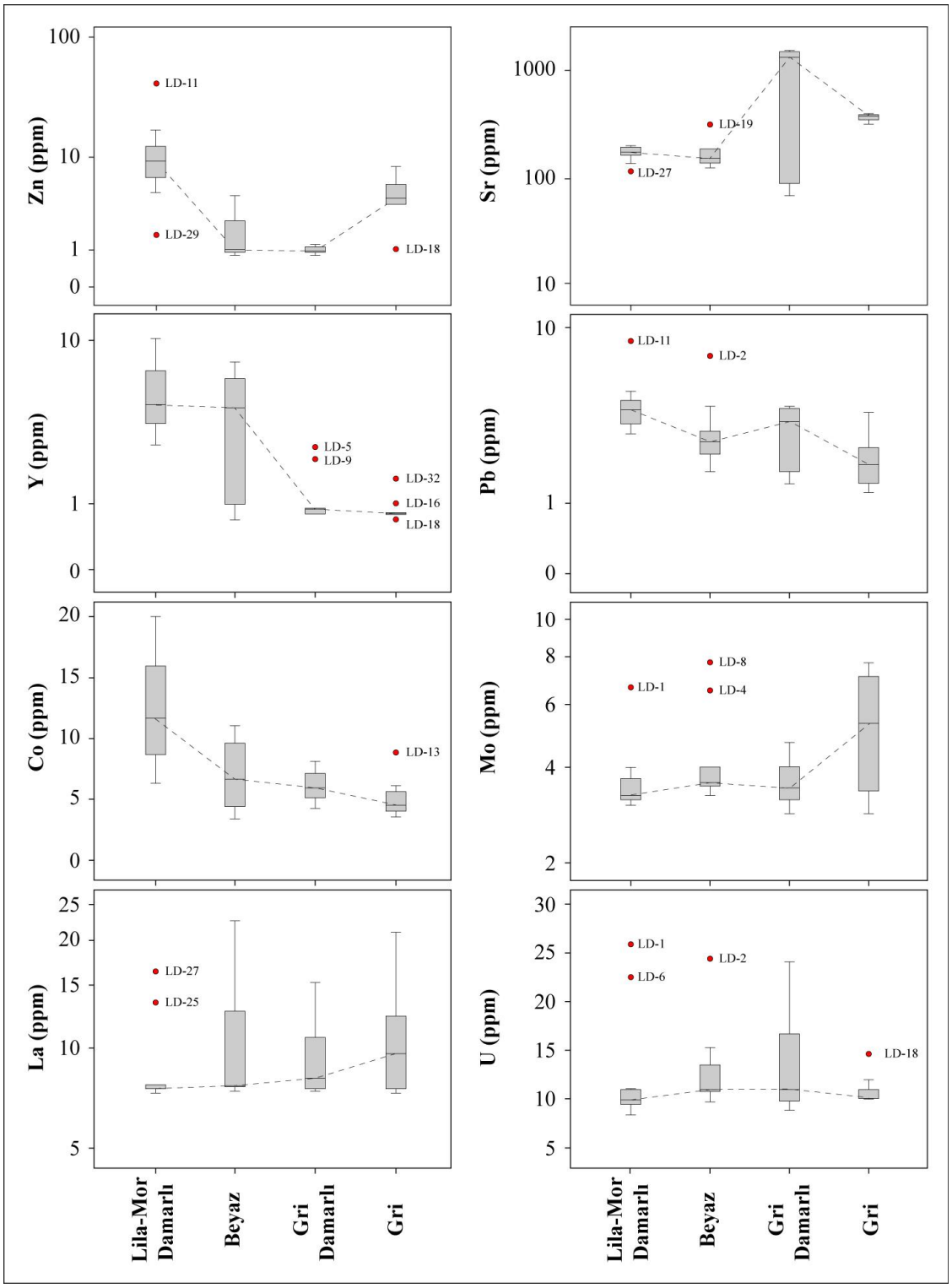
Lila-mor damarlı ve gri renkli mermer gruplarının Zn (ppm) içerikleri diğer mermer gruplarından daha yüksek değerlerde olup, gri renkli mermer örneklerinin Zn (ppm) içerikleri diğer mermer gruplarına göre daha dar bir dağılım aralığına sahiptir. LD-11, LD-29 (lila-mor damarlı) ve LD-18 (gri renkli) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır (Şekil 4.15).

Sr (ppm) içeriği lila-mor damarlı ve beyaz renkli mermer gruplarında benzer dağılımlar gösteriyorken, gri damarlı mermerler diğer mermer gruplarına göre daha geniş bir dağılım aralığına sahiptir. LD-27 (lila-mor damarlı) ve LD-19 (beyaz renkli) numaralı örneklerin dışlak değerler oldukları görülmektedir (Şekil 4.15).

Y (ppm) içerikleri bakımından lila-mor damarlı ve beyaz renkli mermer grupları daha geniş, gri damarlı ve gri renkli mermer gruplarının daha dar dağılım aralıklarına sahip oldukları görülmektedir. Diğer elementlere göre en fazla dışlak değer Y(ppm) elementinde karşımıza çıkmakta olup, LD-5, LD-9 (gri damarlı) ve LD-16, LD-18, LD-32 (gri renkli) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır (Şekil 4.15).

Pb (ppm) içeriğine göre beyaz ve gri renkli mermer grupları simetrik (homojen) bir dağılım göstermektedir. Gri damarlı mermer örnekleri diğer mermer gruplarına göre daha geniş bir dağılım aralığına sahip olup, LD-11 (lila-mor damarlı) ve LD-2 (beyaz renkli) mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır (Şekil 4.15).

Co (ppm) içerikleri bakımından lila-mor damarlı mermer örnekleri diğer mermer gruplarına göre daha geniş bir dağılım aralığına sahiptir. Co (ppm) içerikleri lila-mor damarlı mermer örneklerinden gri renkli mermer örneklerine doğru azalma göstermektedir. Ayrıca LD-13 (gri renkli) mermer örneğinin Co (ppm) içeriği bakımından dışlak değer olduğu görülmektedir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15: Laodikeia mermer örneklerinin bazı iz element içeriklerine ait kutu grafikleri

Lila-mor damarlı, beyaz renkli ve gri damarlı mermer grupları benzer Mo (ppm) içeriklerine sahiptir. Gri renkli mermerler örnekleri diğer mermer gruplarına göre

daha geniş bir dağılım göstermektedir. LD-11 (lila-mor damarlı), LD-4 ve LD-8 (beyaz renkli) numaralı mermer örnekleri dışlak değerlerdir (Şekil 4.15).

La (ppm) içeriklerinin lila-mor damarlı, beyaz ve gri damarlı mermer gruplarında nispeten benzer dağılıma sahip oldukları, gri renkli mermer örneklerinin diğer mermer gruplarına göre simetrik (homojen) bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Bunun yanında LD-27 ve LD-25 (lila-mor damarlı) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır (Şekil 4.15).

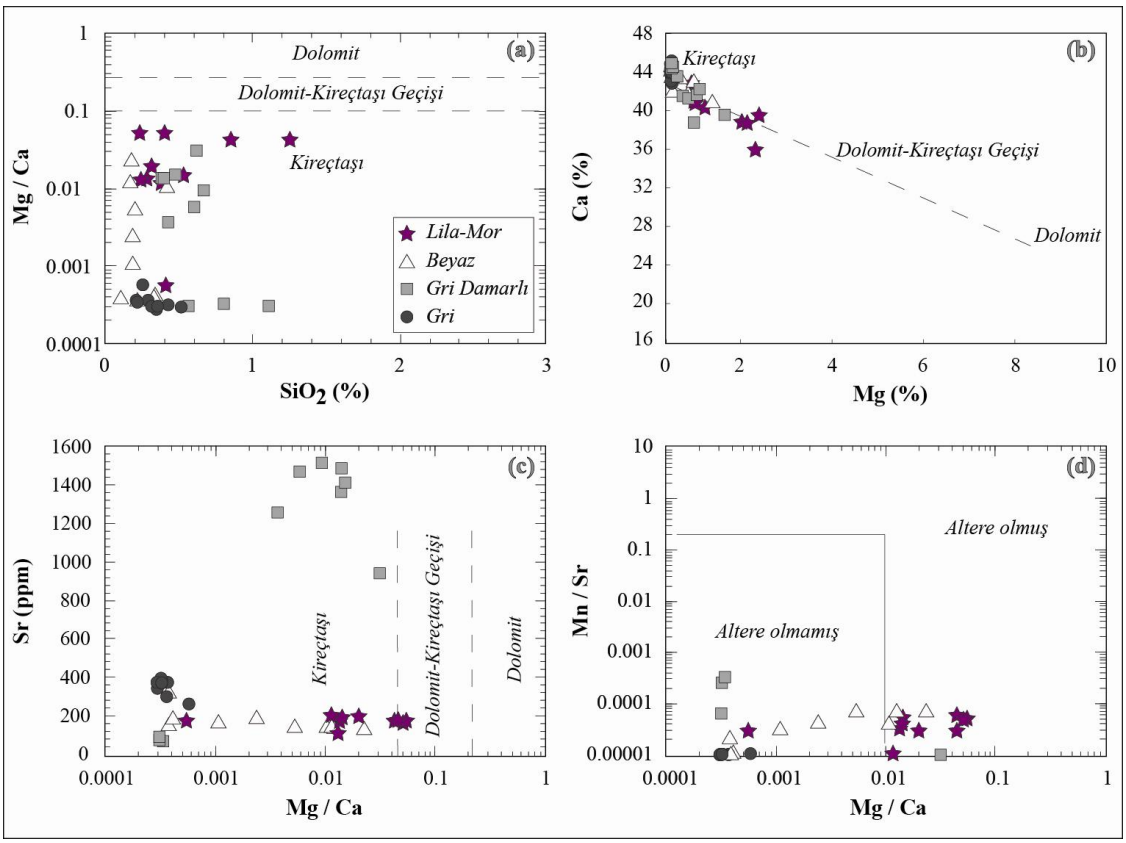
Gri damarlı mermer örnekleri U (ppm) içerikleri bakımından diğer mermer gruplarına göre daha geniş bir dağılıma sahiptir. LD-1 ve LD-6 (lila-mor damarlı), LD-2 (beyaz renkli) ve LD-18 (gri renkli) numaralı mermer örneklerinin dışlak değerler olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.15).

Tapınak-A yapısını oluşturan mermer türlerinin köken kayasını belirlemek amacıyla Melezhik ve diğ. (2001) tarafından geliştirilmiş ayırım diyagramlarından yararlanılmıştır. Bu diyagramlarda başlıca, Ca, Mg, Si, Sr elementleri kullanılmıştır. İlk olarak Mg/Ca-SiO_2 diyagramına yerleştirilen mermer örneklerimizin kireçtaşı alanına düştükleri belirlenmiştir (Şekil 4.16.a). Bu diyagramda dikkat çeken diğer bir nokta örneklerin Mg/Ca oranlarıdır. Mg/Ca oranı lila-mor damarlı mermerlerde 0,01129-0,05375, beyaz renkli mermerlerde 0,00037-0,02280, gri damarlı mermerlerde 0,00031-0,03078 ve gri renkli mermerlerde 0,00029-0,00058 arasında değişmektedir. Beyaz renkli mermerlerin Mg/Ca oranları diğer mermer türlerine göre daha dar bir aralıkta değişim göstermektedir. Mermer örneklerindeki Mg/Ca oranındaki değişimler ilksel kalsit içerisindeki kalıntı kapanımlar tarafından kontrol edilmektedir (Bağcı ve diğ., 2010).

Ca-Mg diyagramında mermer örneklerinin kireçtaşı-dolomit karışım çizgisi üzerinde, çoğunlukla kireçtaşı tarafında yoğunlaşmış oldukları görülmektedir. Benzer şekilde lila-mor damarlı mermer örneklerinin nispeten daha yüksek Mg(%) içeriğine sahip oldukları, gri renkli mermer örneklerinin oldukça sınırlı ve düşük Mg(%) içeriklerine sahip oldukları belirlenmiştir (Şekil 4.16.b).

Sr-Mg/Ca diyagramına yerleştirilen mermer örneklerimizin çoğunlukla kireçtaşı alanında toplanmışlardır (Şekil 4.16.c). Bu diyagramda lila-mor damarlı bazı mermer örneklerinin dolomit-kireçtaşı sınırında yer aldığı, gri damarlı örneklerin büyük

çoğunluğunun diğer örneklere göre yüksek Sr değerlerine sahip oldukları da belirlenmiştir.



Şekil 4.16: Tapınak-A yapısında kullanılan mermer örneklerinin Melezhik ve diğ. (2001) tarafından önerilen a) Mg/Ca-SiO_2 (%) b) Ca(%)-Mg(%), c) Sr (ppm)-Mg/Ca ve d) Mn/Sr-Mg/Ca diyagramlarındaki konumları

Diyajenez, metamorfizma ve metasomatizma gibi çökelme sonrası süreçler, mermer örneklerinde ilksel C, O ve Sr izotop bileşimlerini değiştirebilmektedir. Bu gibi süreçler karbonat kayacındaki Sr içeriğini düşürürken, Mn içeriğini arttırmaktadır. Melezhik ve diğ. (2001)'e göre Mn/Sr > 0,2 ve Mg/Ca > 0,01 değerleri karbonat kayaçlarındaki çökelme sonrası meydana gelen değişimleri göstermektedir. Bu yüzden bu sınır değerlere yakın örneklerin özellikle izotop stratigrafi çalışmalarında kullanılması tavsiye edilmemektedir. Göreceli olarak düşük Sr bileşimli ve yüksek Mg/Ca ve Mn/Sr oranlarına sahip örnekler olasılıkla ilksel izotop oranları değişmiş örnekleri ifade etmektedir. Laodikeia mermer örnekleri Mn/Sr-Mg/Ca diyagramında çoğunlukla (lila-mor damarlı örnekler dışında) altere olmamış alanda toplanmışlardır (Şekil 4.16.d). Mn/Sr oranı lila-mor damarlı mermerlerde 0,00001-0,00006, beyaz renkli mermerlerde 0,00001-0,00007, gri damarlı mermerlerde 0,000002-0,00033 ve

gri renkli mermerlerde 0,000003-0,00006 arasında değişmektedir. Gri renkli mermerlerin Mn/Sr oranları diğer mermer türlerine göre oldukça dar bir aralıkta değişim göstermektedir.

4.5.2 Kimyasal analiz verilerinin ayrışım fonksiyonu analizi

Ayrışım fonksiyonu analizi (Discriminant Analysis) X veri setindeki değişkenlerin iki ve daha fazla gerçek gruplara ayrılmasını sağlayan, birimlerin p tane özelliğini ele alarak bu birimlerin doğal ortamdaki gerçek gruplarına, sınıflarına en uygun düzeyde atanmalarını sağlayacak fonksiyonlar türeten bir yöntemdir. Ayrışım fonksiyonu analizinin başlıca iki yararı vardır. Bunlar; **i)** grupları birbirinden ayırmayı sağlayan fonksiyonları bulmak ve **ii)** hesaplanan fonksiyonlar aracılığıyla yeni gözlenen bir birimi sınıflama hatası minimum olacak biçimde gruptan herhangi birine atamaktır (Özdamar, 2004). Monomineralli bir kayaç olan mermerlerin birbirine yakın kimyasal analiz sonuçları vermesi nedeniyle sadece kimyasal analiz sonuçlarını kullanarak bir ayrıma gidebilmek oldukça zordur. Bu nedenle istatistik biliminden yararlanılmış ve analiz sonuçlarına ayrışım fonksiyon analizi uygulanarak anlamlı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Jeokimyasal analizlerde kullanılan mermer örnekleri gerek Tapınak-A yapısı ve gerekse antik ocaklardan herhangi bir sistematiğe dayandırılmadan alınan örnekler olduğu için istatistik bilimi açısından non-parametrik ve homojen olmayan veriler olarak değerlendirilmektedir (Akgül ve Çevik, 2005). Bu varsayımdan hareketle SPSS istatistik programında non-parametrik testlerden çoklu bağımsız değişken grupları için Kruskall Wallis H testi uygulanmıştır. Bu test sonuçları tablo 4.4' de verilmiştir. Tablo 4.4' deki Kruskall Wallis H testi sonuçlarının anlamlı bir fark ifade etmesi ve güven aralığının %95 olması için p değerlerinin 0,05'ten küçük olması istenmektedir.

Buna göre, mermer türleri arasında 49 element' ten 30 tanesi (Na_2O, MgO, Al_2O_3, SiO_2, P_2O_5, SO_3,Cl, K_2O, CaO, TiO_2, MnO, Fe_2O_3, V, Cr, Co, Ni, Zn, As, Rb, Sr, Y, Zr, Ba, Hf, Ta, W, Au, Tl, Pb, Bi) istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu varsayımla $p < 0,05$ değerleri dikkate alınmış, bu değere sahip elementler seçilerek ayrışım fonksiyon analizine gidilmiştir.

Tablo 4.4: Tapınak-A yapısı mermer örneklerinin Kruskall Wallis H test sonuçları

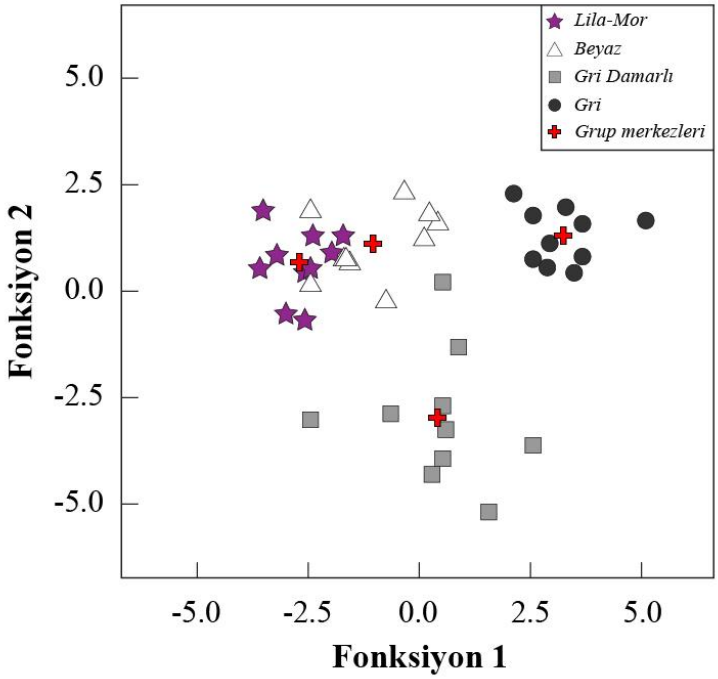
Elementler	Ki-Kare	df	p	Elementler	Ki-Kare	df	p
Na_2O	18,307	3	,000	**Zr**	8,202	3	,042
MgO	25,312	3	,000	**Nb**	3,360	3	,339
Al_2O_3	17,188	3	,001	**Mo**	5,531	3	,137
SiO_2	17,469	3	,001	**Ag**	6,090	3	,107
P_2O_5	17,071	3	,001	**Cd**	,450	3	,930
SO_3	15,568	3	,001	**In**	4,105	3	,250
Cl	8,036	3	,045	**Sn**	1,809	3	,613
K_2O	14,710	3	,002	**Sb**	3,088	3	,378
CaO	20,664	3	,000	**Te**	2,292	3	,514
TiO_2	15,167	3	,002	**I**	,873	3	,832
MnO	13,238	3	,004	**Cs**	6,101	3	,107
Fe_2O_3	28,907	3	,000	**Ba**	12,433	3	,006
V	17,282	3	,001	**La**	1,692	3	,639
Cr	9,801	3	,020	**Ce**	1,483	3	,686
Co	17,426	3	,001	**Hf**	20,784	3	,000
Ni	12,208	3	,007	**Ta**	13,964	3	,003
Cu	4,001	3	,261	**W**	9,054	3	,029
Zn	27,055	3	,000	**Au**	18,572	3	,000
Ga	7,502	3	,058	**Hg**	3,080	3	,379
As	9,437	3	,024	**Tl**	8,670	3	,034
Se	3,380	3	,337	**Pb**	13,840	3	,003
Br	4,143	3	,246	**Bi**	17,013	3	,001
Rb	8,818	3	,032	**Th**	4,904	3	,179
Sr	14,481	3	,002	**U**	3,321	3	,345
Y	21,953	3	,000				

Tapınak-A yapısında kullanılan mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizi eigen değerleri, % varyans, % kümülatif eigen değeri ve kanonik korelasyon katsayıları tablo 4.5’ de gösterilmiştir.

Tablo 4.5: Tapınak-A yapısı mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizine göre ilk 3 kanonikal ayrışım fonksiyonun eigen değerleri, %varyans ve % kümülatif eigen değerleri

Fonksiyon	Eigen Değeri	% Varyans	% Kümülatif Eigen Değeri	Kanonikal Korelasyon
1	5.268	52.9	52.9	0.917
2	3.371	33.8	86.7	0.878
3	1.322	13.3	100.0	0.755

Şekil 4.17 Tapınak-A yapısı mermer türlerinin iki boyutlu olarak kümelenmesini göstermektedir. Bu dağılım diyagramına göre mermer örnekleri başarılı bir şekilde birbirinden ayrılmaktadır. Kimyasal bileşim açısından lila-mor damarlı mermer örnekleri beyaz renkli mermer örneklerine yakınlık gösterirken, gri damarlı ve gri renkli mermer örneklerinden açık bir farklılık göstermektedirler.



Şekil 4.17: Laodikeia Tapınak-A yapısı mermer türleri kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak ayrışım fonksiyon analizi ile iki boyutta kümelenmesi

4.6 Tapınak-A Yapısı Mermer Örneklerinin Duraylı İzotop (C ve O) Jeokimyası

C ve O izotop oranlarının analizi antik dönem yerleşim alanlarında kullanılan mermer türü yapıtaşlarının köken ve kaynak alanlarının belirlenmesinde yaygın ve etkili bir şekilde kullanılan metotlardan biridir. Diğer pek çok element gibi C ve O doğada birden fazla izotopa sahip elementlerdir. Karbon elementi iki duraylı izotopu [^{12}C (bolluk oranı %98,89) ve ^{13}C (bolluk oranı %1,11)] ve bir tane radyoaktif izotopu (^{14}C) olmak üzere üç izotopa sahiptir. Karbon izotopları okyanus suyunun çevirimi sırasında oluşabilecek değişimlerin izlemek için kullanılır. $^{13}C/^{12}C$ oranı δ simgesi ile ifade edilir ve paleoiklim göstergesi olarak değerlendirilir (Rollinson, 1993).

Oksijen elementi ise duraylı üç izotopa sahiptir. Bunlar bolluk oranı %99,76 ile ^{16}O, bolluk oranı %0,037 ile ^{17}O, bolluk oranı %0,204 ile ^{18}O izotoplarıdır. ^{17}O izotopunun doğadaki derişiminin çok küçük olması nedeniyle jeokimyasal çalışmalarda kullanılmaz. Oksijen izotopları su çevirimleri, paleoiklim, ozon ve karbondioksit gibi atmosferik gazlardaki değişimleri izlemek için kullanılır. $^{18}O/^{16}O$ oranı δ simgesi ile ifade edilir. Referans olarak VSMOW (Vienna standart Mean Ocean Water) veya VPDB (Vienna PeeDee Belemnite) standartları kullanılır. Bu referanslardan VPDB paleoiklim çalışmalarında kullanılırken, VSMOW su çevirimleri, ozon ve karbondioksit gibi atmosferik gazlardaki değişimleri izleme çalışmalarında kullanılmaktadır (Rollinson, 1993; Faure, 2001). Birbirinin aynı olup farklı kökene sahip ve/veya birbirinden farklı olup aynı kökene sahip malzemelerin izotop bileşimleri birbirinden farklıdır. Fiziksel veya kimyasal işlevler sonucu ortaya çıkan izotop bileşimindeki değişimler izotop ayrımlaşması ile ilişkilidir. İzotop ayrımlaşması fiziksel veya kimyasal bir süreç sırasında bir izotopun başka bir izotopa göre miktarının oransal olarak artması olarak tanımlanır.

Herhangi bir lokasyondaki karbonat kayaçların karbon ve oksijen izotoplarındaki değişimler bu kayaçları meydana getiren jeolojik olaylar ile yakından ilişkilidir. Karbonat kayaçların $^{13}C/^{12}C$ ve $^{18}O/^{16}O$ oranları; **(1)** ilksel kayaç bileşimine, **(2)** karbonat minerallerinin oluştuğu ortamdaki (deniz, göl) ve oluşum sonrası kayaçla etkileşim halinde olan meteorik suların izotop bileşimine, **(3)** çökelme ortamındaki biyolojik yaşamın çeşitliliğine (foraminifer ve mollusk türü kavkılı canlılar), **(4)**

metamorfizma derecesine (sıcaklık, basınç), **(5)** küresel ve mevsimsel süreçlerdeki farklılaşmalara bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Grosman ve Ku, 1986; Herz, 1987; Gogoni ve diğ. 1998; Faure, 2001; Attanasio, 2003). Mermer örneklerinin C ve O izotop bileşimlerinde değişime neden olan diğer süreçler fiziksel-kimyasal ayrışma ve biyolojik etkinliktir. Fiziksel-kimyasal ayrışma mermer örneklerinin C izotop değerlerinde önemli bir değişime neden olmazken, O izotop değerlerinde azalmaya neden olmaktadır. Bu bakımdan mermer yapının toprak altında gömülü ve açıkta kalan kısımlarının O izotop değerleri arasında farklılıklar görülmektedir. Yapılan bir çalışmada 50 yıllık bir ayrışma süreci sonunda O izotop değerlerinin başlangıçtaki değerlere göre ‰ 0.6' lık bir azalma görülmüştür. Liken, bakteri ve mermer üzerinde gelişen mikrofloranın varlığı özellikle C izotopları üzerinde etkilidir. (Herz ve Garisson, 1998).

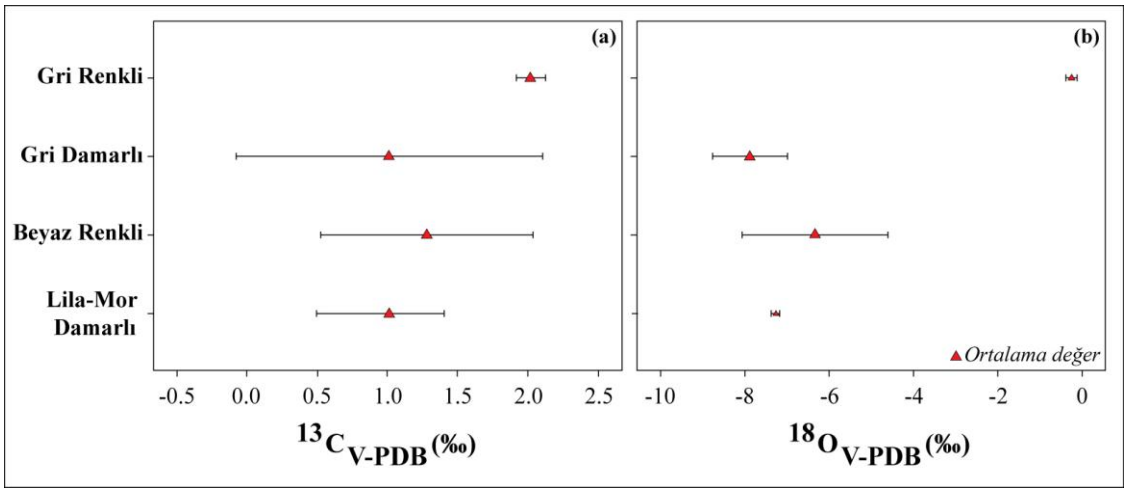
Arkeolojik alanlardaki mermerlerin oksijen ve karbon izotopları üzerindeki ilk çalışma Harmon ve Valerie Craig (1972) tarafından yapılmıştır. Daha sonraki yıllarda Manfra ve diğ. (1975), Germann ve diğ. (1980) ve Herz (1985; 1987) tarafından izotop veri tabanları geliştirilmiştir. Akdeniz havzasında arkeolojik öneme sahip yerleşim alanlarının oldukça fazla olması bu bölgede yapılan arkeometri çalışmalarının da fazla olması sonucunu beraberinde getirmiştir. Herz (1992) Akdeniz havzasındaki antik mermer ocakları ve eserlerin duraylı izotop analizlerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur. Bu çalışmanın ardından Akdeniz havzasında iyi bilinenen Penteli (Matthews ve diğ., 1992; Goette ve diğ., 1999; Pike, 1999; Pike ve diğ., 2002), Marmara Adası (Asgari ve Matthews, 1995; Attanasio ve diğ., 2008), Carrara (Herz ve Dean, 1986; Gorgoni ve diğ., 1998; Attanasio ve diğ., 2000) mermerleri üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların tamamında birkaç metodun (Petrografi, MGS ölçümü, XRD, XRF, Kütle spektrometre ve EPR analizi gibi) birlikte kullanılması ile önemli sonuçlara ulaşılmıştır.

Arazi gözlemleri, mineralojik-petrografik ve jeokimyasal incelemelerin anlatıldığı bölümlerde, Laodikeia antik kenti Tapınak-A yapısını oluşturan mermer örnekleri 4 farklı gruba ayrılmıştı. Mermer gruplarının C ve O izotop değerlerini belirlemek amacıyla; her bir mermer grubundan 10 adet olmak üzere toplam 40 adet mermer örneğinin C ve O izotop analizleri yapılmıştır. Örnek gruplarına ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçlar tablo 4.6' da verilmiştir.

Tablo 4.6: Tapınak-A yapısı mermer türlerine ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçları

Mermer Grubu	Örnek No	$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ (‰)	$\delta^{18}O_{V\text{-}PDB}$ (‰)
Lila-mor damarlı	**LD-01**	1,53	-7,41
	LD-06	0,29	-7,43
	LD-07	1,48	-7,46
	LD-11	0,06	-7,37
	LD-25	1,36	-7,22
	LD-26	1,46	-7,30
	LD-27	-0,05	-7,14
	LD-28	1,48	-7,15
	LD-29	0,76	-7,24
	LD-30	1,12	-7,04
Beyaz renkli	**LD-02**	-0,20	-7,50
	LD-04	1,28	-7,77
	LD-08	2,05	-2,20
	LD-19	2,36	-2,66
	LD-20	-0,38	-7,90
	LD-21	2,12	-7,94
	LD-22	0,33	-7,91
	LD-23	0,91	-7,58
	LD-24	2,14	-3,79
	LD-31	2,19	-8,10
Gri damarlı	**LD-05**	-1,47	-6,78
	LD-03	-1,38	-6,78
	LD-09	0,38	-5,26
	LD-12	2,46	-8,56
	LD-35	2,17	-8,98
	LD-36	2,15	-9,16
	LD-37	2,29	-8,33
	LD-38	2,27	-8,89
	LD-39	0,19	-7,96
	LD-40	1,05	-8,01
Gri renkli	**LD-10**	1,79	-0,65
	LD-13	1,95	-0,17
	LD-14	2,12	-0,17
	LD-15	1,93	-0,28
	LD-16	1,90	-0,12
	LD-17	1,90	-0,47
	LD-18	2,21	-0,16
	LD-32	2,13	-0,29
	LD-33	2,21	-0,13
	LD-34	2,08	-0,04

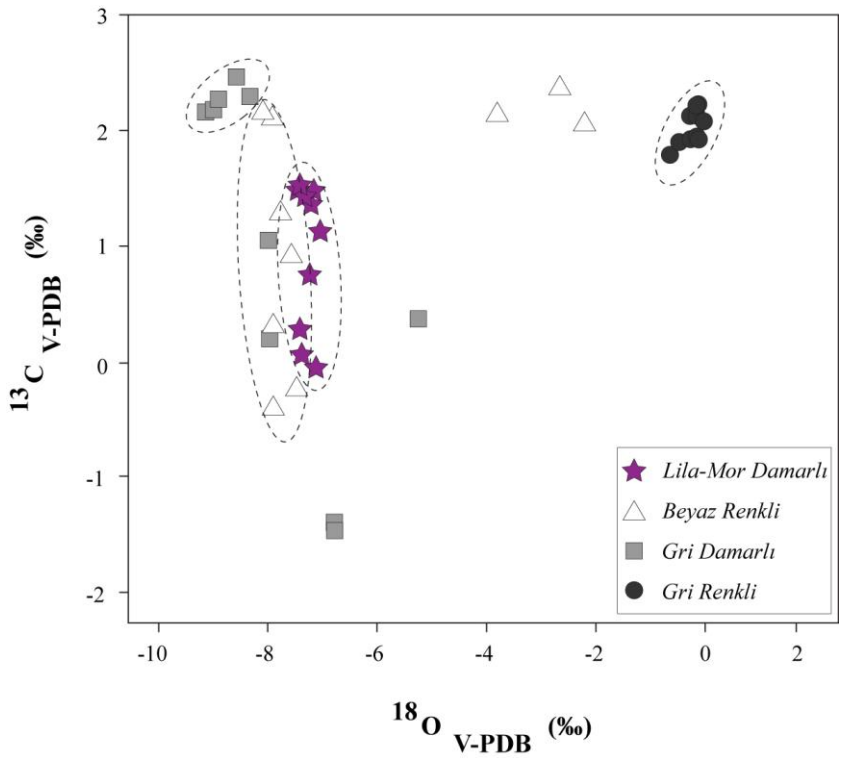
C ve O izotop değerlerinin mermer gruplarındaki dağılımları Şekil 4.18'de görülmektedir. Duraylı izotop analizleri sonucunda $\delta^{13}C$ izotop değerlerinin lila-mor damarlı mermer örneklerinde (-0.05)-1.53, beyaz renkli mermer örneklerinde (-0.38)-2.36, gri damarlı mermer örneklerinde (-1.47)-2.46 ve gri renkli mermer örneklerinde 1.90-2.21 arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 4.18.a). Benzer olarak $\delta^{18}O$ izotop değerlerinin lila-mor damarlı mermer örneklerinde (-7.46)-(-7.04), beyaz renkli mermer örneklerinde (-8.10)-(-2.20), gri damarlı mermer örneklerinde (-9.16)-(-5.26) ve gri renkli mermer örneklerinde (-0.65)-(0.04) arasında değiştiği görülmüştür (Şekil 4.18.b). Diyagramlarda lila-mor damarlı mermer örneklerinin O izotop değerleri, gri renkli mermer örneklerinin C ve O izotop değerleri bakımından oldukça sınırlı bir dağılım aralığına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18: Tapınak-A yapısı mermer türlerinin a) C izotop, b) O izotop değerleri dağılım grafikleri

$\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramına yerleştirilen Tapınak-A yapısı mermer örneklerinden lila-mor damarlı, beyaz ve gri damarlı mermer örneklerinin benzer C ve O izotop değerleri bakımından düşey yönde bir kümelenme gösterdikleri görülmektedir (Şekil 4.19). Özellikle lila-mor damarlı ve beyaz renkli mermer örneklerinin C ve O izotop değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Aynı diyagram üzerinde gri renkli mermer örneklerinin diğer mermer gruplarına göre daha farklı bir bölgede kümelendikleri görülmektedir.

Jeokimyasal incelemelerle belirlenen sonuçların bir benzerine duraylı izotop incelemelerinde de rastlanılmış ve Tapınak-A yapısı mermer örnekleri duraylı izotop bileşimleri bakımında da başarılı bir şekilde ayrılmıştır.



Şekil 4.19: $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Tapınak-A yapısı mermer türlerinin konumu

5. LAODİKEİA ÇEVRESİ ANTİK OCAKLARINDAKİ MERMERLERİN MİNEROLOJİK, PETROGRAFİK, JEOKİMYASAL VE DURAYLI İZOTOP ÖZELLİKLERİ

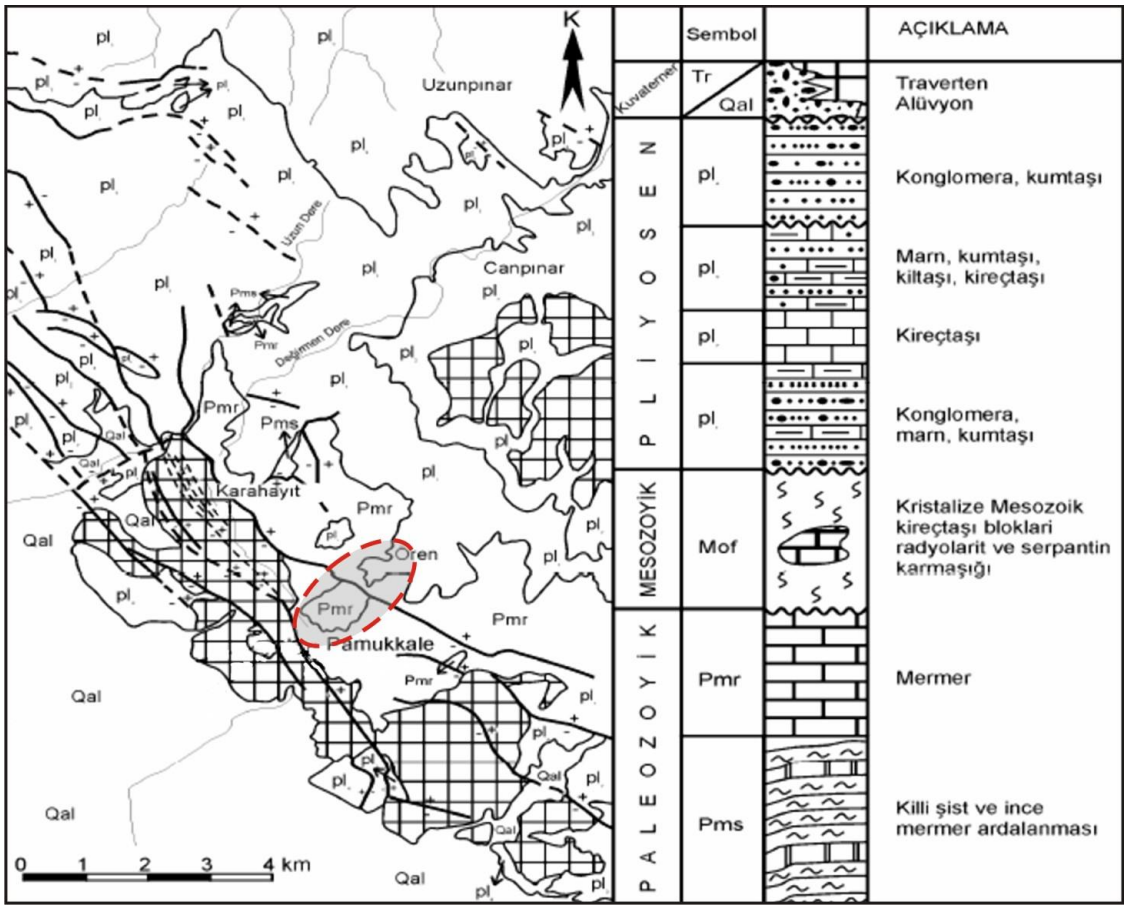
Bu bölümde Laodikeia Tapınak-A yapısında kullanılan mermerlerin kaynak alanını belirlemek amacıyla bölgeye yakın olan üç ocaktan (Hierapolis, Domuzderesi ve Afrodisias) mermer örnekleri alınmıştır. Bu ocaklardan toplanan örnekler üzerinde Tapınak-A yapısı mermer örneklerine uygulanan analiz yöntemleri (CRS çalışmaları dışında) uygulanmıştır.

5.1 Hierapolis (Pamukkale) Antik Ocaklarının Jeolojik Yapısı

Denizli il merkezine 18 km uzaklıktaki Hierapolis antik kenti bembeyaz travertenleri, termal kaynaklardan çıkan ılık şifalı suları ve antik dönemde Lykos olarak tanımlanan vadinin en hâkim noktasında yer alması nedeniyle oldukça ilgi çekmektedir (Şekil 1.1). Özellikle güncel traverten oluşumları nedeniyle UNESCO tarafından Dünya Kültür Mirası listesinde yer alan Hierapolis antik kenti, Bergama Kralı II. Eumenes ile M.Ö. 188 yılında imzalanan Apemeia barışının hemen arkasından kurulmuş ve adını Bergama'nın efsanevi kurucusu Telephos'un eşi amazonlar kraliçesi Hiera'dan almıştır.

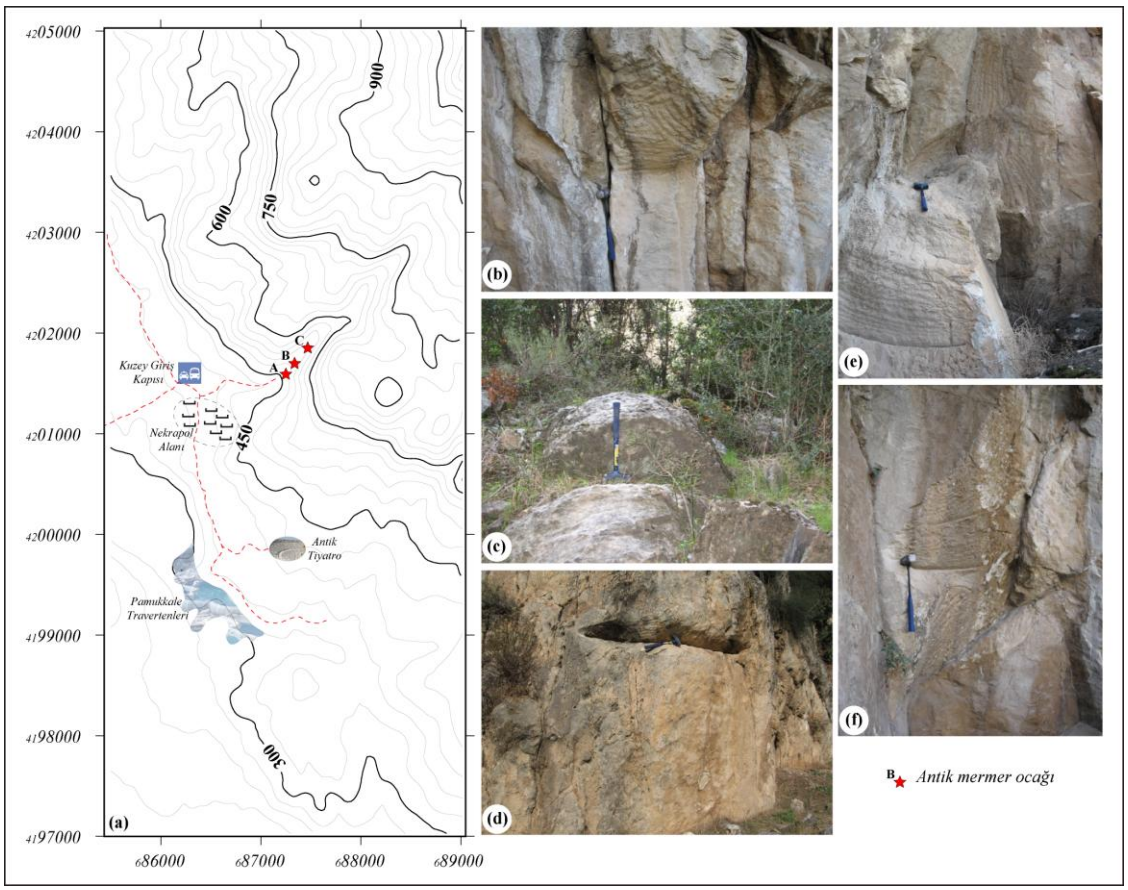
Hierapolis antik kenti aktif olarak açılan D-B uzanımlı Büyük Menderes ile KB-GD uzanımlı Gediz Grabenlerinin kesiştiği bölgede yer alır (Altunel ve Barka, 1996). Bölgede Menderes Masifi'ne ait metamorfik kayaçlar ile Mesozoyik, Pliyosen ve Kuvaterner yaşlı kaya birimleri yüzeylenmektedir (Şekil 5.1). Hierapolis antik ocağı ve çevresinde görülen en yaşlı kaya birimleri Menderes Masifine ait metamorfik kayaçlardır. Gnays, kuvarsit, kalkşist, klorit, biyotit, muskovitşist ve mermerlerden oluşan metamorfitler almandin-amfibolit ve yesilşist fasiyeslerinde metamorfizma geçirmişlerdir. Karbonatlı kayaçlar, beyaz, gri damarlı, gri renklerde olup, yer yer şist ara seviyeleri ve mercekleri içermektedir. Pliyosen yaşlı çökeller çoğunlukla kırıntılı sedimanter kaya birimleri ile temsil edilmektedir. Hierapolis antik kenti

çevresinde yaygın olarak görülen traverten oluşumları ve düzlük alanlardaki alüvyonlar Kuvaterner döneminin başlıca birimlerini oluşturmaktadır (Şekil 5.1) (Güner ve Elhatip, 1999).



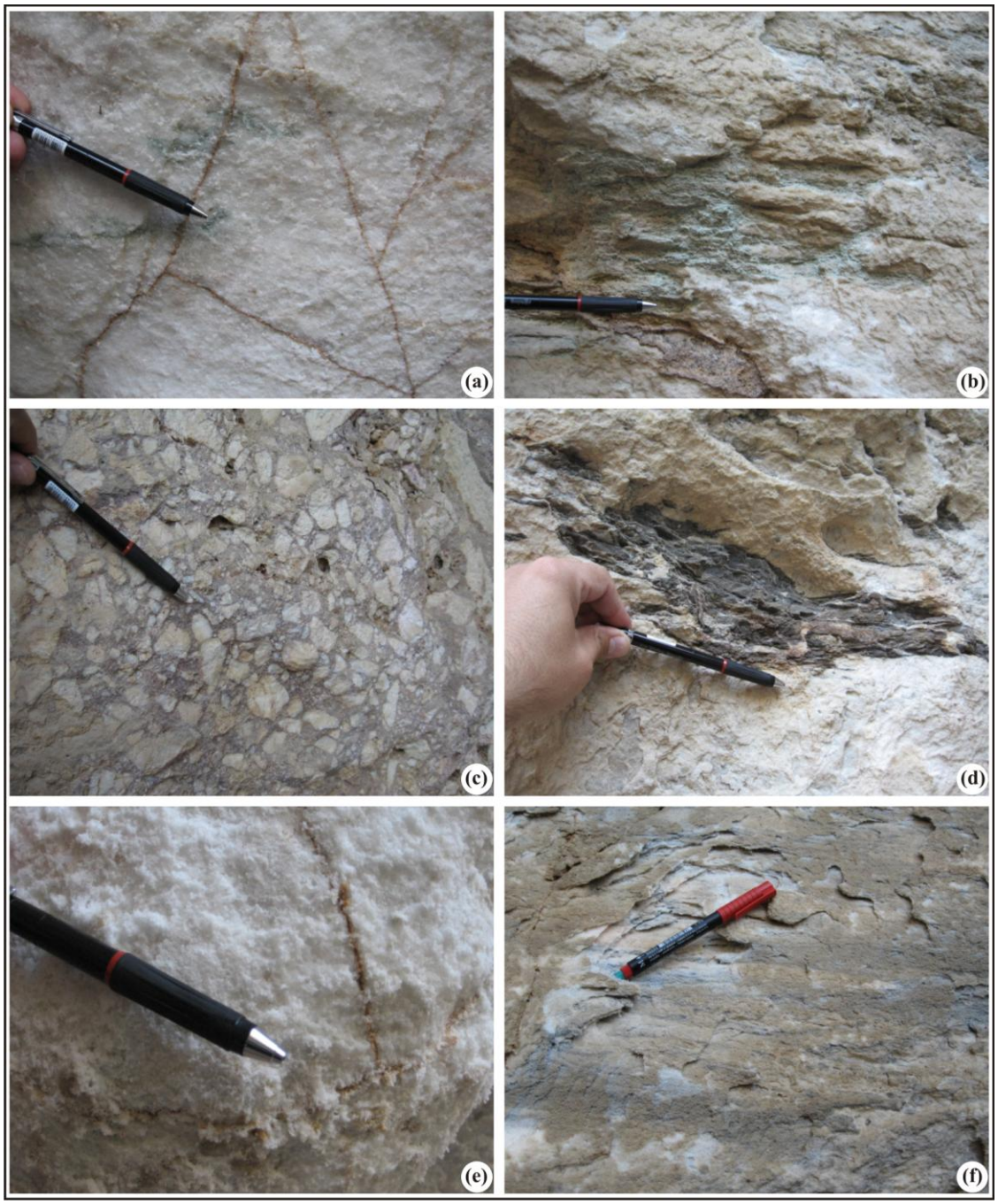
Şekil 5.1: Hierapolis (Pamukkale) antik ocağı ve civarının jeoloji haritası (Güner ve Elhatip 1999' dan değiştirilerek alınmıştır)

Hierapolis antik ocakları Pamukkale ören yerinin kuzey giriş kapısı yakınındaki vadi içerisinde yer almaktadır (Şekil 5.2.a). Vadi boyunca 3 adet işletme yapılmış ocak aynasına rastlanılmıştır. Ocak aynalarında blok, sütun çıkarmak amacıyla kesici ve delici aletler kullanılmasından kaynaklanan farklı yönlerde keski izleri, yarı işlenmiş sütun parçaları görülmektedir. Bununla birlikte ana kaya kütlesi üzerinde belli aralıklarla bir hat boyunca dizilmiş oyuklara rastlanılmıştır. Bu oyuklara tahta kamalar çakılmış, daha sonra bu kamalara su emdirilerek tahtanın genişlemesi ve taşın çatlatılarak ana kaya kütlesinden ayrılması sağlanmış olmalıdır (Şekil 5.2.b, c, d, e, f).



Şekil 5.2: Hierapolis antik ocaklarının konumu ve görüntüleri a) Hierapolis antik mermer ocaklarını gösteren topografik harita b) antik dönemde taş ocağı olarak kullanıldığı gösteren farklı yönlerdeki keski izleri c) yarı işlenmiş silindir şekilli sütun yapısı d) blok çıkarmak için ana kütlede açılmış oygu ve keski izleri e, f) ocak aynalarında görülen farklı yönlerdeki keski izleri

Örnekleme yapılan üç ocakta da beyaz renkli, gri damarlı ve gri renkli mermer türleri gözlenmiştir. Bunun dışında özellikle C ocağında kırmızı-kahverengi ve yeşil damarlı seviyeler ile kırmızı çimentolu breşik mermer oluşumlarına rastlanmıştır (Şekil 5.3.a, b, c). C numaralı ocakta dikkati çeken diğer bir nokta ocağın üst kotlarında mermerler içerisinde koyu renkli şist merceklerinin varlığıdır (Şekil 5.3.d). Ayrıca C ocağında ki mermerlerde şekerlenme olarak tanımlayabileceğimiz (kayacın kolaylıkla ufalanıp daha küçük parçalara ayrılması) bozunma türüne rastlanılmıştır (Şekil 5.3.e, f).



Şekil 5.3: Hierapolis C ocağında gözlenen yapılar a) kırmızı-kahverengi damarlı b) yeşil damarlı c) kırmızı çimentolu breşik mermer oluşumları d) mermerler içerisinde koyu renkli şist mercekleri e, f) mermerlerde şekerlenme ve kabuklanma olarak tanımlanan bozunmalar

5.1.1 Hierapolis (Pamukkale) antik ocağı mermerlerinin makroskopik özellikleri

Hierapolis antik ocaklarında görülen mermer türlerinin petrografik özelliklerini belirleyebilmek amacıyla beyaz renkli, beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli mermer örneklerinden toplam 29 adet örnek alınmıştır.

Beyaz renkli mermerlerin atmosfer ile etkileşim halinde bulunan yüzeyleri genellikle koyu gri/gri ile kahverengimsi sarı renklerde olup, taze kırık yüzeyleri beyaz renklidir (Şekil 5.4.a, b). Beyaz renkli mermer örnekleri renk olarak homojen bir görünümde olup, bileşenlerin tane boyutu orta-iri (2-5 mm) arası büyüklüktedir. Beyaz renkli mermerleri oluşturan bileşenler camsı parlaklığa sahip olup, kristal yüzeyleri güneş ışığı altında parlamaktadır (Şekil 5.4.b). Mermer örnekleri %10'luk HCl asit çözeltisi damlatıldığında oldukça fazla miktarda köpürmektedir. Bu durum örnekleri oluşturan bileşenlerinin çoğunluğunun karbonat minerallerinden (kalsit) oluştuğunu göstermektedir.

Beyaz renkli mermerler ile ardalanmalı olarak görülen beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin kristalleri çıplak gözle ve lupla kolaylıkla görülebilmektedir. Bu tür mermerlerin en karakteristik özelliği damarlı bir yapı göstermesidir (Şekil 5.4.c). Damarlar gri renkli olup, çoğunlukla düzensiz ve dalgalı bir görünümdedir. Damar genişlikleri 0.05-0.2 cm arasında değişmektedir. Gri damarlı mermer örneklerinin tane boyutları ince-orta (100µm-5mm) arasında değişmekte olup, bazı iri kristal yüzeyleri güneş ışığı altında parlamaktadır (Şekil 5.4.d).

Gri renkli mermer örneklerinin atmosfer ile temas halinde olan yüzeyleri koyu kahverengi - sarımsı kahverengi renkli olup, taze kırık yüzeyleri koyu gri, siyahımsı gri renklidir. Gri renkli mermer örnekleri içerisinde beyaz renkli, çeşitli genişlikte ve iri kalsit kristalleri tarafından doldurulmuş damar yapıları görülmektedir (Şekil 5.4.e). Ayrıca bu tür mermerlerde belirgin olarak mineral yönlenmesi görülmektedir (Şekil 5.4.f). Gri renkli mermer örneklerini oluşturan bileşenler çıplak gözle kolaylıkla görülmekte olup, kristal boyutları genellikle ince-orta (100µm-5mm) arasında değişmektedir.

Şekil 5.4: Hierapolis antik ocaklarındaki mermerlerin makroskopik görünümleri a, b) beyaz renkli mermerlerin arazi ve el örneği c, d) beyaz renkli gri damarlı mermerlerin arazi ve el örneği e, f) gri renkli mermerlerin arazi ve el örneğinde görülen mineral yönlenmesi

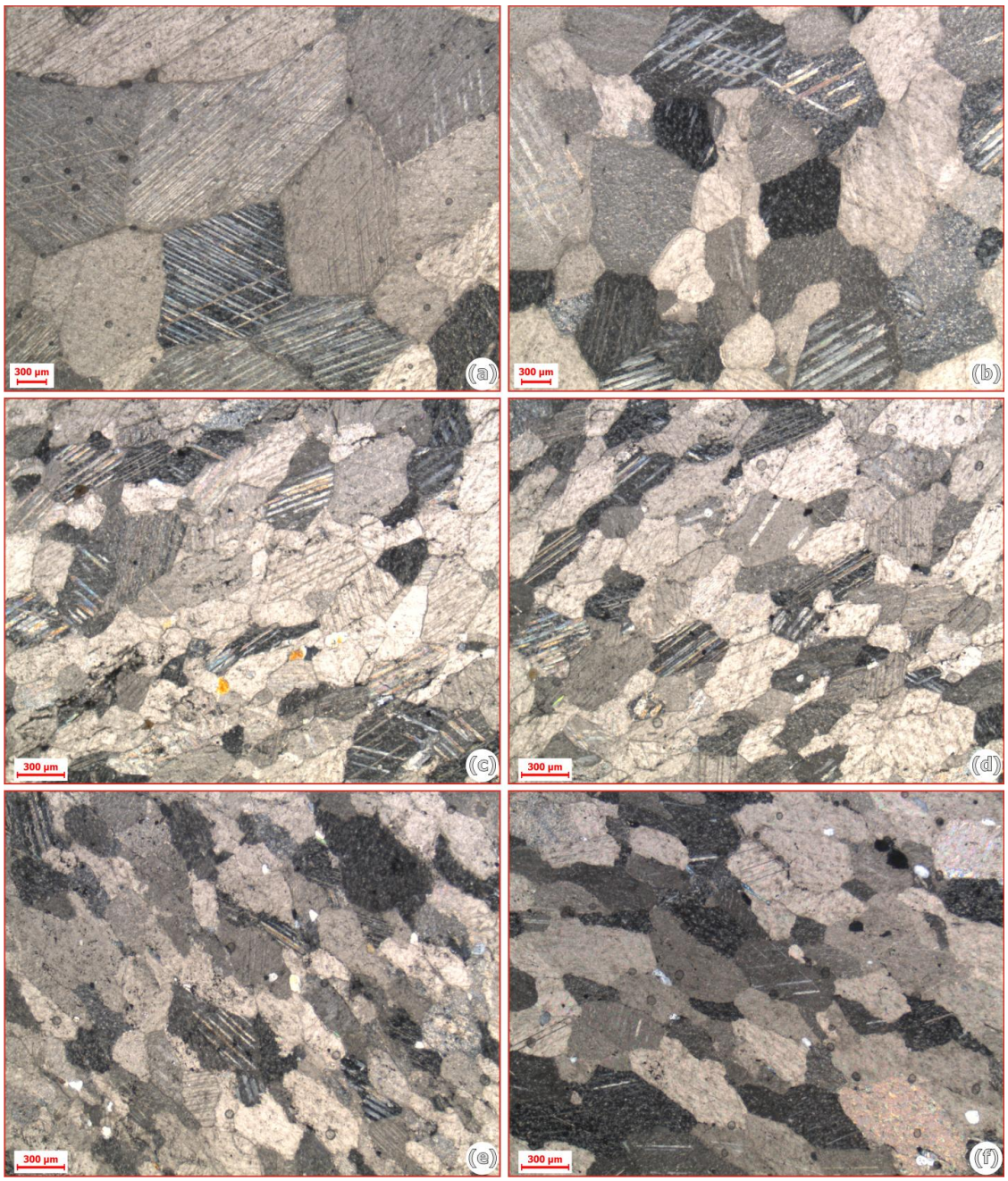
5.1.2 Hierapolis (Pamukkale) antik ocağı mermerlerinin mikroskopik özellikleri

A, B, C numaralı ocaklardan alınan mermer örneklerinin mineralojik bileşimi ve dokusal özelliklerini belirlemek amacıyla ince kesit çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla makro özelliklerine göre üç farklı gruba ayrılan mermerlerden alınan 13 adet örnek üzerinde petrografik incelemeler için incekesitler hazırlanmıştır.

Beyaz renkli mermer örnekleri heteroblastik poligonal doku göstermektedir. Mermerleri oluşturan bileşenlerin sınır ilişkileri oldukça düzenlidir (Şekil 5.5.a). Örnekleri oluşturan karbonat mineralleri (kalsit, dolomit) çoğunlukla kalsit türündendir. Karbonat mineralleri özşekilli-yarı özşekilli olup, boyutları 317-3804 µm arasında değişmektedir. Karbonat minerallerinde rombohedral dilinim izleri belirgin olup, dilinim açısı 42º-55º arasında değişmektedir. Bununla birlikte polisentetik ikizlenmeler yaygın olarak görülmektedir (Şekil 5.5.b).

Beyaz renkli gri damarlı mermer örnekleri heteroblastik mozaik dokuda olup, karbonat mineralleri (kasit, dolomit), daha az oranda kuvars, piroksen ve muskovit minerallerden oluşmaktadır (Şekil 5.5.c). İncelenen örneklerde tipik olarak mineral yönlenmesi görülmektedir (Şekil 5.5.d). Karbonat mineralleri çoğunlukla özşekilsiz kristaller halinde olup, kristal boyutları 268-711 µm arasında değişmektedir. Örnekleri oluşturan karbonat minerallerinde rombohedral dilinim izleri belirgin olup, dilinim açısı 43º-50º arasındadır. Gri damarlı mermer örneklerinde görülen piroksen ve kuvars mineralleri yuvarlak ve özşekilsiz kristaller halinde olup, kristal boyutları 30-100 µm arasında değişmektedir.

Gri renkli mermer örnekleri heteroblastik mozaik dokuda olup, egemen olarak karbonat mineralleri (kalsit, dolomit) ve daha az miktarda kuvars, piroksen minerallerinden oluşmaktadır (Şekil 5.5.e). İncelenen örneklerden HRP-12 ve HRP-14 numaralı örnekte karbonat mineralleri ile birlikte piroksen minerali görülmüştür. Gri renkli mermerleri oluşturan bileşenler tipik olarak yönlenme göstermektedir (Şekil 5.5.f).



Şekil 5.5: Hierapolis antik ocaklarındaki mermerlerin mikroskop görüntüleri a) beyaz renkli mermer örneklerinde görülen düzenli sınırlar b) beyaz renkli mermer örneklerindeki karbonat minerallerinde görülen polisentik ikizlenmeler c) beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinde gözlenen heteroblastik mozaik doku ve piroksen mineralleri d) beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinde görülen mineral yönlenmesi e) gri renkli mermer örneklerinde gözlenen heteroblastik mozaik doku ve yuvarlaklaşmış kuvars mineralleri f) gri renkli mermerlerde bileşen yönlenmesi ve kuvars mineralleri

Örnekleri oluşturan karbonat mineralleri baskın olarak kalsit bileşiminde olup, çoğunlukla özşekilsiz kristaller halinde görülmektedir. Kalsit kristal boyutları 204-1318 µm arasında değişmektedir. İri kristallerde rombohedral dilinim izleri belirgin olup, dilinim açısı 34º-59º arasındadır. İncelenen kesitlerin büyük bir kısmında kuvars ve piroksen mineralleri yuvarlaklaşmış tekil kristaller halinde ve dağınık olarak görülmektedir (Şekil 5.5.e, f).

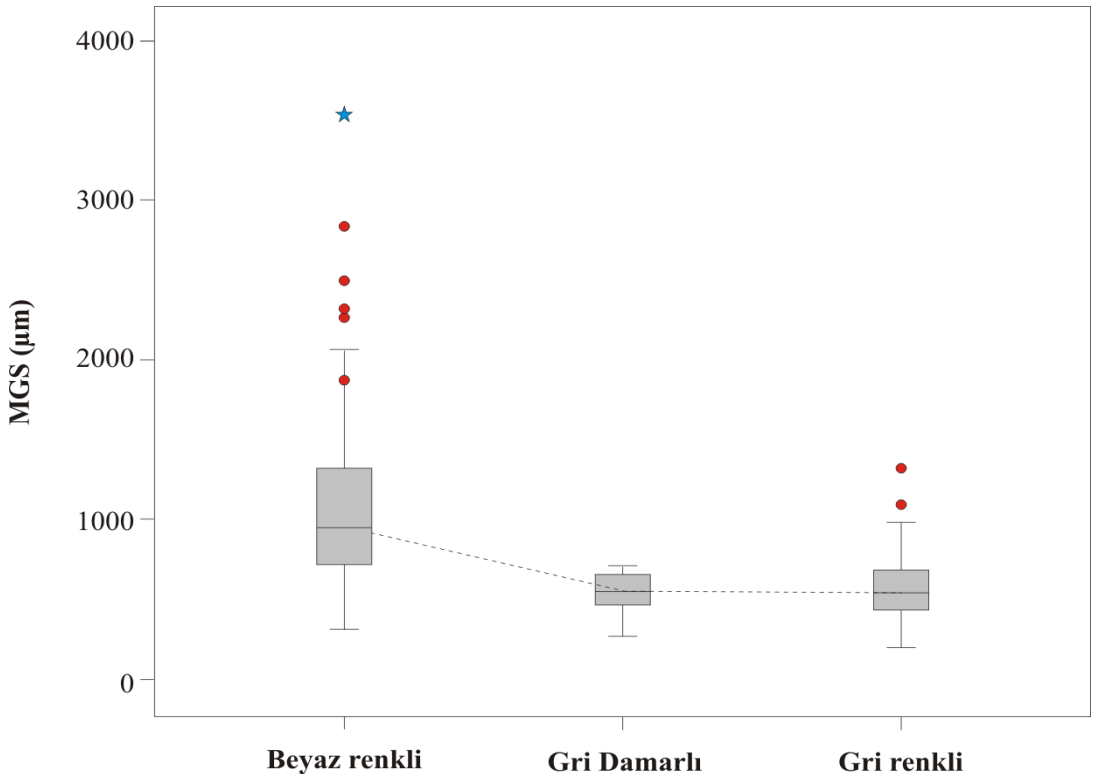
5.1.2.1 Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin MGS ölçümleri

Hierapolis A, B, C numaralı antik ocaklardan alınan mermer örneklerinin incekesitleri üzerinde MGS ölçümleri gerçekleştirilmiştir. MGS ölçümlerinde kristallerin uzun eksenleri boyunca ölçüm yapılmasına dikkat edilmiştir. MGS ölçüm sonuçları tablo 5.1' de verilmiştir.

Tablo 5.1: Hierapolis antik ocaklarındaki mermer türlerinin MGS ölçüm sonuçları

Mermer Türü	**Tane Boyutu (µm)**			
	Minimum	**Maksimum**	**Ortanca**	**Standart sapma**
Beyaz renkli	317,630	3804,284	952,741	507,652
Gri damarlı	268,025	711,005	555,306	118,559
Gri renkli	204,502	1318,837	542,414	182,358

Ölçümler sonucunda en büyük tane boyu beyaz renkli mermer örneklerinde gözlenmiştir. Beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli mermer örneklerinin ortanca değerleri açısından benzer ve aynı zamanda simetrik (homojen) bir dağılıma sahip oldukları belirlenmiştir (Şekil 5.6).

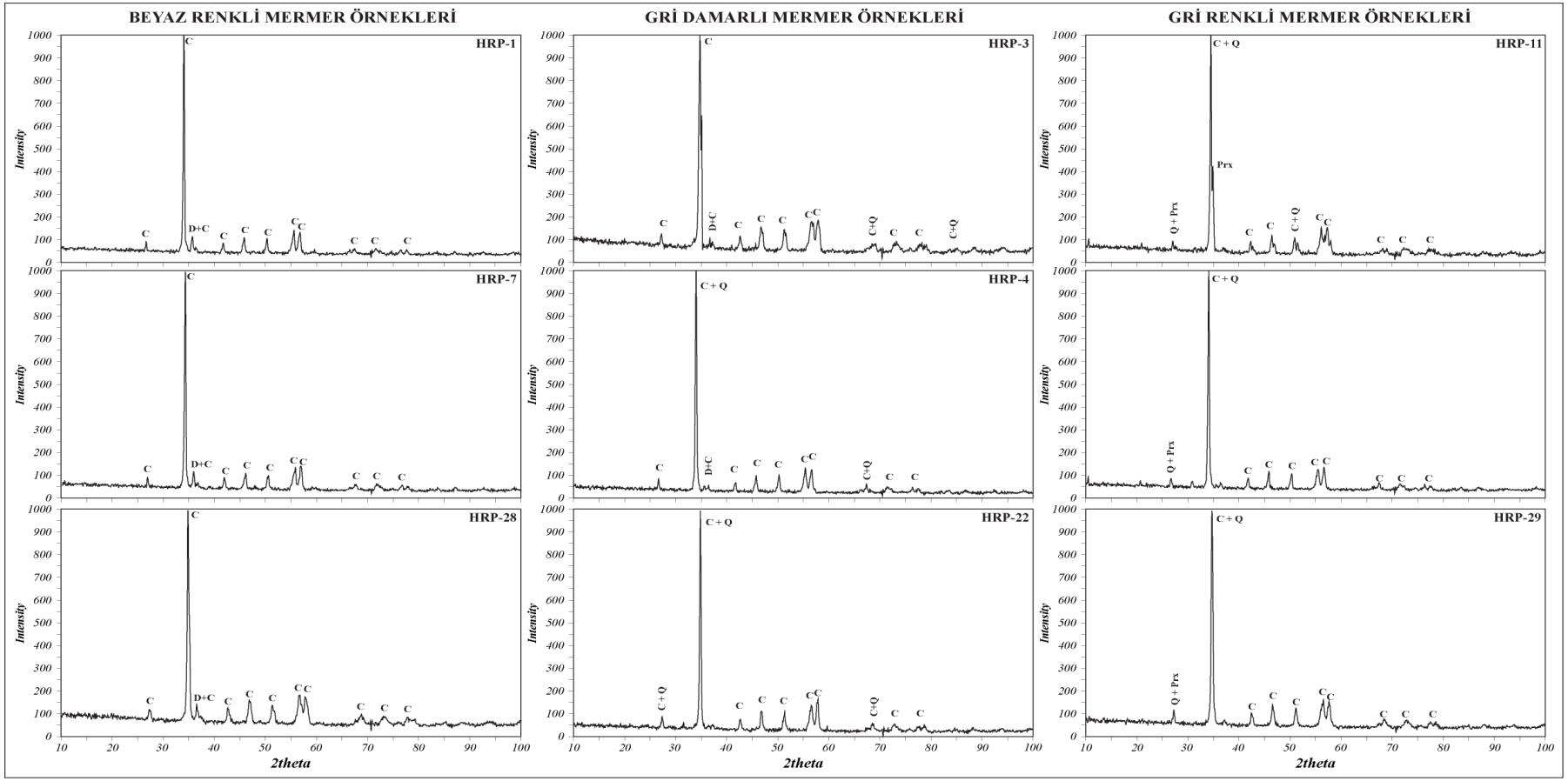


Şekil 5.6: Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin MGS ölçümlerini gösteren kutu grafikleri

5.1.3 Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin XRD incelemeleri

Optik mikroskop çalışmaları ile türü belirlenemeyen karbonat minerallerini (kalsit, dolomit) tanımlamak ve mermer örnekleri içerisindeki farklı bileşenleri belirleyebilmek için farklı renk ve doku özelliği gösteren 9 adet mermer örneği üzerinde XRD çalışmaları yapılmıştır. Farklı renklerdeki mermer örneklerinin XRD grafiklerinde benzer desen ilişkileri görülmüştür. Mermer örneklerini oluşturan bileşenlerin büyük oranda karbonat minerallerinden oluştuğu düşünüldüğünde daha az miktarda bulunan farklı minerallere (kuvars, piroksen gibi) ait piklerin maskelenmiş olabileceği doğal bir sonuçtur.

Tüm kayaç toz XRD sonuçlarına göre; beyaz renkli mermer örneklerinde kalsit ve daha az miktarda dolomit piklerinin varlığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinde baskın olarak kalsit, daha az miktarda dolomit ve kuvars pikleri görülmektedir. Gri renkli mermer örneklerinde kalsit piklerine ek olarak piroksen (ojit) ve kuvars piklerinin varlığı belirlenmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7: Hierapolis antik ocakları mermer örneklerine ait XRD grafikleri

5.1.4 Hierapolis antik ocaklarındaki mermer örneklerinin jeokimyasal özellikleri

Petrografik ve XRD çalışmalarında farklılıkları belirlenen mermer örneklerinin jeokimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla ana ve iz element analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarının kutu grafikler kullanılarak yorumlaması yapılmış ve mermer örneklerinin kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Mermer örneklerine ait jeokimyasal analiz sonuçları ek B.1'de verilmiştir.

5.1.4.1 Ana ve iz element özellikleri

Hierapolis mermer örnekleri Na_2O (%) içeriği bakımından birbirine benzer bir dağılım göstermektedir. Ortanca değerleri birbirine yakın olan mermer örneklerinden beyaz renkli olanlarının simetrik (homojen) bir dağılıma sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.8)

MgO (%) içerikleri bakımından Hierapolis mermer örnekleri kısmen farklı dağılıma sahip oldukları görülmektedir. Gri damarlı ve gri renkli mermer örneklerinin birbirine benzer ve asimetrik bir dağılıma sahip olduğu, beyaz renkli mermer örneklerinin ise bunlardan farklı ve daha geniş bir değer dağılımı gösterdiği görülmektedir. Ayrıca gri renkli mermer örneklerinden HRP-12 numaralı örnek dışlak değerleri oluşturmaktadır (Şekil 5.8).

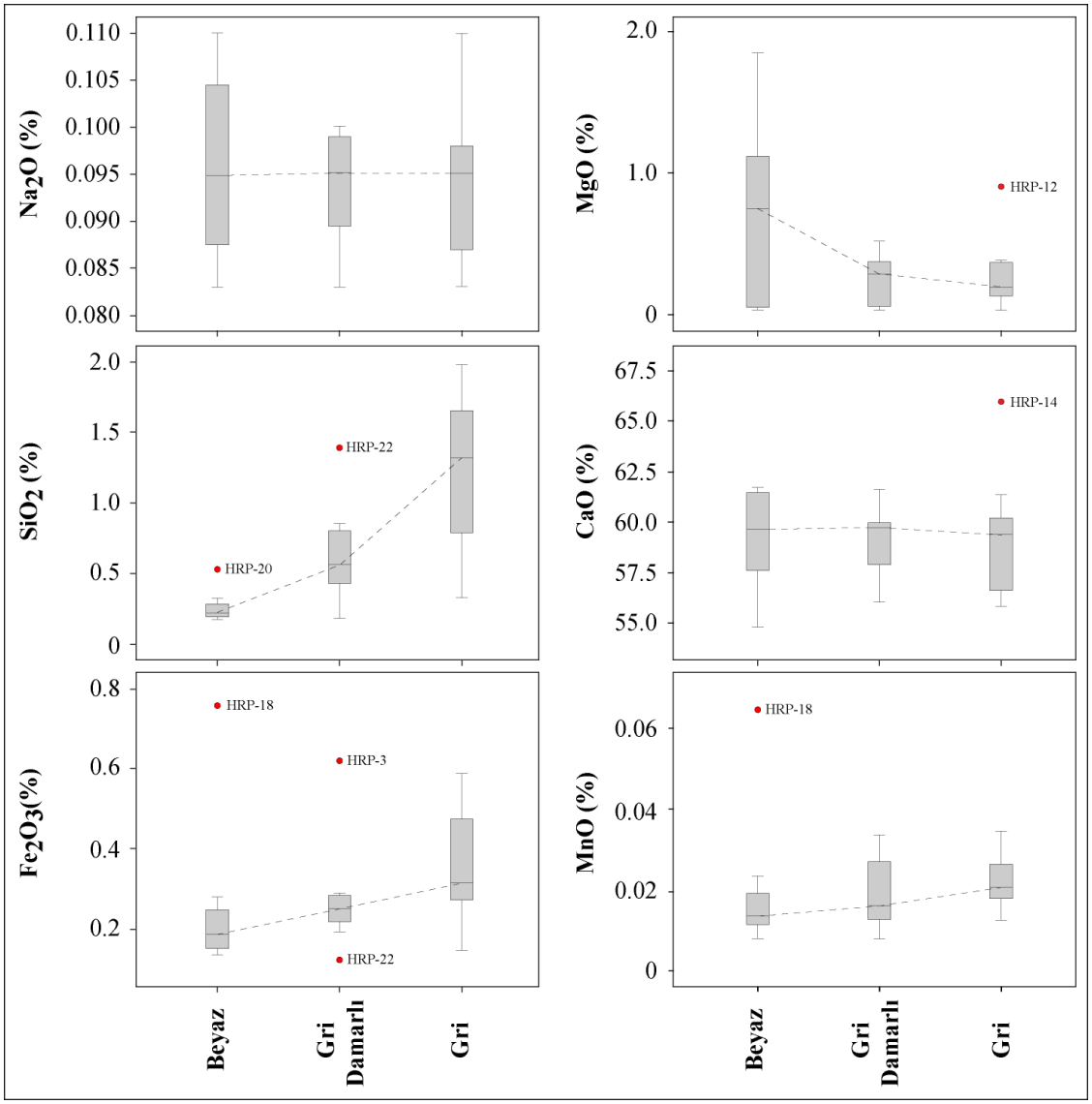
SiO_2 (%) içeriklerinde beyaz renkli mermerlerden gri renkli mermerlere doğru belirgin bir artış görülmektedir. Beyaz renkli mermer örnekleri SiO_2 (%) içeriği bakımından oldukça sınırlı bir dağılım gösteriyorken, gri renkli mermer örnekleri oldukça geniş dağılım göstermektedir (Şekil 5.8). HRP-20 (beyaz renkli) ve HRP-22 (gri damarlı) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır

CaO (%) içerikleri bakımından Hierapolis mermer örnekleri benzer dağılım desenlerine sahiptir. Mermer örneklerinin ortanca (medyan) değerleri göreceli olarak birbirine yakın olup, beyaz renkli mermerler simetrik (homojen) dağılım göstermektedir (Şekil 5.8). Gri renkli mermerlerden HRP-14 numaralı örnek dışlak değeri oluşturmaktadır.

Fe_2O_3 (%) içeriklerinde beyaz renkli mermerlerden gri renkli mermerlere doğru belirgin bir artış görülmektedir. Gri renkli mermer örnekleri diğer mermer

örneklerine göre daha geniş bir dağılım ve daha yüksek Fe_2O_3 (%) değerlerine sahiptir (Şekil 5.8). Gri damarlı mermer örnekleri simetrik (homojen) dağılıma sahip olup, HRP-18 (beyaz renkli), HRP-3 ve HRP-22 (gri damarlı) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır.

MnO (%) içerikleri bakımından beyaz renkli ve gri damarlı mermer örnekleri birbirlerine benzer bir dağılım desenine sahiptir. HRP-18 (beyaz renkli) numaralı mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8: Hierapolis antik ocakları mermer türlerinin bazı ana oksit element içerikleri gösteren kutu grafikleri

Hierapolis mermer örneklerinin Zn (ppm) içeriklerinde beyaz renkli mermerlerden gri renkli mermerlere doğru belirgin bir artış görülmektedir (Şekil 5.9). Gri renkli

mermerlerin diğer mermer gruplarına göre daha geniş bir dağılım aralığına asahip oldukları, HRP-2 (beyaz), HRP-10 (gri damarlı) ve HRP-11 (gri renkli) mermer örneklerinin dışlak değerleri oluşturdukları belirlenmiştir.

Sr (ppm) içeriği bakımından üç farklı renk mermer grubununda nispeten geniş dağılım aralıklarına sahip oldukları görülmektedir. Gri damarlı ve gri renkli mermer örneklerinin birbirine yakın Sr içeriklerine sahip olup, gri renkli mermerler simetrik (homojen) bir dağılım göstermektedir (Şekil 5.9).

Y (ppm) içeriklerinde beyaz renkli mermerlerden gri renkli mermerlere doğru belirgin bir düşüş görülmektedir (Şekil 5.9). Beyaz renkli örneklerin Y (ppm) içerikleri kısmen daha simetrik (homojen) bir dağılıma sahip olup, HRP-18 (beyaz) ve HRP-23 (gri damarlı) numaralı örnekler dışlak değerleri oluşturmaktadır.

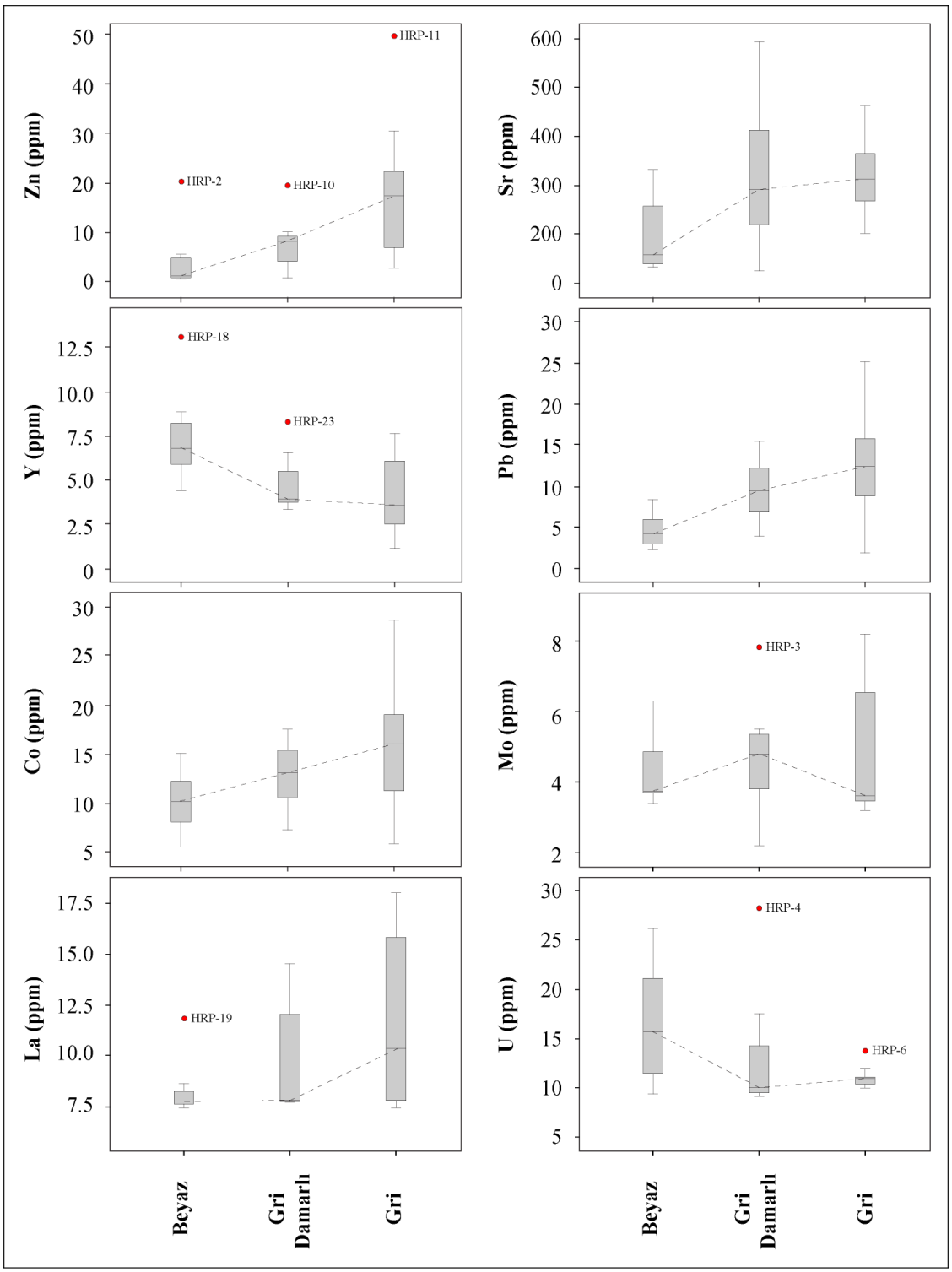
Hierapolis örneklerinin Pb (ppm) içerikleri beyaz renkli mermer örneklerinden gri renkli mermer örneklerine doğru artış göstermektedir (Şekil 5.9). Pb içeriği bakımından mermer grupları simetrik (homojen) dağılım sergilemektedir.

Co (ppm) içerikleri beyaz renkli mermer örneklerinden gri renkli mermer örneklerine doğru belirgin bir artış göstermektedir. Co içeriği bakımından mermer grupları simetrik (homojen) dağılım sergilemektedir (Şekil 5.9).

Mo (ppm) içeriği bakımından beyaz renkli, gri damarlı ve gri renkli mermer grupları asimetrik bir dağılım sergilemektedir. En geniş dağılım aralığı gri renkli mermer örneklerinde görülmekte olup, HRP-3 (gri damarlı) numaralı mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır (Şekil 5.9).

La (ppm) içerikleri bakımından beyaz renkli mermer örnekleri oldukça sınırlı bir dağılım aralığına sahiptir. Gri renkli mermer örnekleri geniş bir dağılım aralığına sahip olup, HRP-19 (beyaz) numaralı mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır (Şekil 5.9).

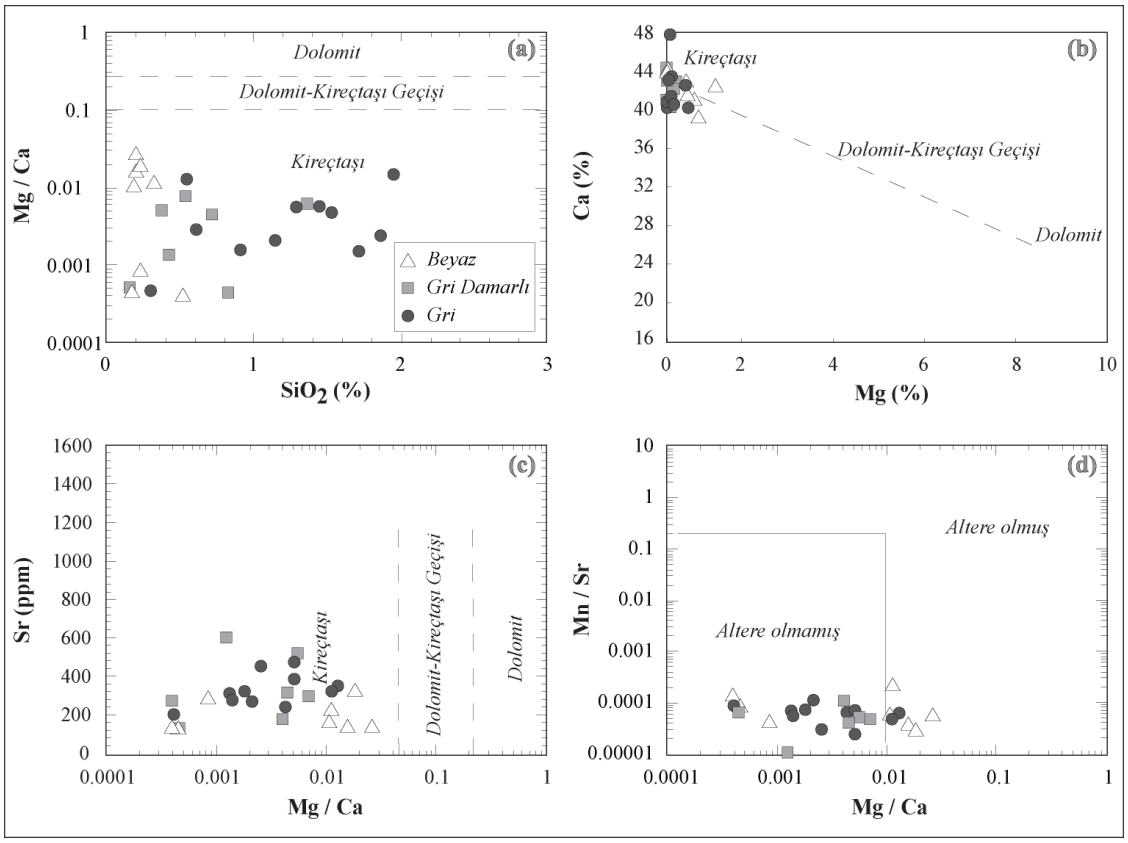
U (ppm) içerikleri bakımından beyaz renkli mermer örneklerinden gri renkli mermer örneklerine doğru belirgin bir azalma görülmektedir (Şekil 5.9). Gri renkli mermer örnekleri oldukça sınırlı bir dağılım aralığına sahip olup, HRP-4 (gri damarlı) ve HRP-6 (gri renkli) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır.



Şekil 5.9: Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin bazı iz element içeriklerini gösteren kutu grafikleri

Hierapolis antik ocaklarından toplanan farklı renk ve doku özelliği gösteren mermer örneklerinin köken kayasını belirlemek amacıyla Melezhik ve diğ. (2001) tarafından geliştirilmiş ayırım diyagramları kullanılmıştır. Mg/Ca-SiO_2 diyagramına yerleştirilen Hierapolis mermer örneklerinin kireçtaşı alanına düştükleri belirlenmiştir (Şekil 5.10.a). Örneklerin Mg/Ca oranı beyaz renkli mermerlerde 0,00039-0,02619, gri damarlı mermerlerde 0,00042-0,00731 ve gri renkli mermerlerde 0,00043-0,01359 arasında değişmektedir. Beyaz renkli mermerlerin Mg/Ca oranları diğer mermer türlerine göre daha dar bir aralıkta değişim göstermektedir.

Hierapolis antik ocağı mermer örnekleri Ca-Mg diyagramında kireçtaşı-dolomit karışım çizgisi üzerinde, kireçtaşı kısımında toplanmıştır. Beyaz renkli mermerlerin Mg (%) içerikleri diğer mermer türlerine göre kısmen daha geniş bir dağılım göstermektedir (Şekil 5.10.b).



Şekil 5.10: Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin Melezhik ve diğ. (2001) tarafından geliştirilmiş a) Mg/Ca-SiO_2 (%) b) Ca(%)-Mg(%), c) Sr (ppm)-Mg/Ca ve d) Mn/Sr-Mg/Ca diyagramlarındaki konumları

Sr-Mg/Ca diyagramına yerleştirilen Hierapolis mermer örnekleri kireçtaşı alanına düşmektedir (Şekil 5.10.c). Bu diyagramda örneklerin Sr içeriği bakımndan birbirlerine yakın değerlerde oldukları görülmektedir.

Hierapolis mermer örnekleri Mn/Sr-Mg/Ca diyagramında çoğunlukla (beyaz renkli örnekler dışında) altere olmamış alana düşmektedir (Şekil 5.10.d). Mn/Sr oranı beyaz renkli mermerlerde 0,00003-0,00022, gri damarlı mermerlerde 0,000010-0,000099 ve gri renkli mermerlerde 0,000022-0,000102 arasında değişmektedir. Mermer örneklerinin Mn/Sr oranları birbirine yakın değerlerdedir. Sonuç olarak Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin düşük Sr, Mg/Ca ve Mn/Sr değerlerine sahip oldukları için olasılıkla ilksel izotop oranları değişmemiş örnekleri temsil ettikleri söylenebilir.

5.1.4.2 Kimyasal analiz verilerinin ayrışım fonksiyonu analizi

Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin kimyasal analiz verilerine uygulanan Kruskal Wallis H testi sonuçları tablo 5.2' de verilmiştir.

Kruskal Wallis H anlamlılık testine göre analiz edilen 49 elementten 16 tanesi (Al_2O_3, SiO_2, SO_3, K_2O, TiO_2, V, Cr, Zn, As, Rb, Sr, Y, Zr, Ta, Au, Pb) istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu varsayımla $p<0,05$ değerleri dikkate alınmış, bu değere sahip elementler seçilerek ayrışım fonksiyon analizine gidilmiştir. Hierapolis antik ocakları mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizi eigen değerleri, % varyans, % kümülatif eigen değeri ve kanonik korelasyon katsayıları tablo 5.3' de gösterilmiştir.

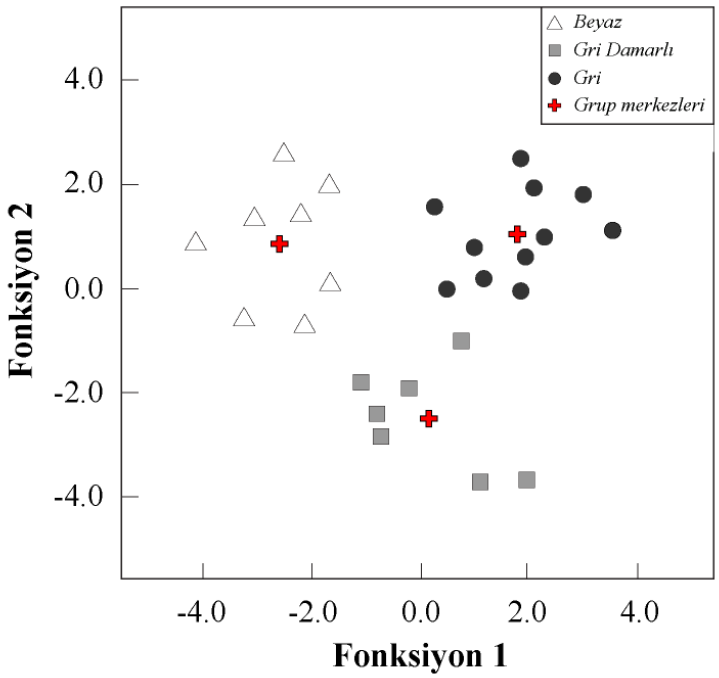
Tablo 5.2: Hierapolis mermer örneklerinin Kruskall Wallis H test sonuçları

Elementler	Ki-Kare	df	p	Elementler	Ki-Kare	df	p
Na_2O	0,039	2	0,981	**Zr**	7,399	2	0,025
MgO	1,457	2	0,483	**Nb**	1,382	2	0,501
Al_2O_3	8,891	2	0,012	**Mo**	0,107	2	0,948
SiO_2	14,667	2	0,001	**Ag**	0,767	2	0,681
P_2O_5	3,834	2	0,147	**Cd**	1,945	2	0,378
SO_3	9,719	2	0,008	**In**	1,88	2	0,391
Cl	0,814	2	0,666	**Sn**	1,299	2	0,522
K_2O	10,273	2	0,006	**Sb**	0,854	2	0,652
CaO	0,43	2	0,806	**Te**	3,194	2	0,202
TiO_2	8,06	2	0,018	**I**	4,949	2	0,084
MnO	3,493	2	0,174	**Cs**	3,433	2	0,18
Fe_2O_3	5,354	2	0,069	**Ba**	2,765	2	0,251
V	8,939	2	0,011	**La**	3,669	2	0,16
Cr	16,579	2	0	**Ce**	0,906	2	0,636
Co	4,624	2	0,099	**Hf**	3,988	2	0,136
Ni	0,341	2	0,843	**Ta**	9,653	2	0,008
Cu	0,382	2	0,826	**W**	4,326	2	0,115
Zn	8,349	2	0,015	**Au**	8,785	2	0,012
Ga	0,49	2	0,783	**Hg**	1,717	2	0,424
As	8,302	2	0,016	**Tl**	4,033	2	0,133
Se	2,012	2	0,366	**Pb**	10,147	2	0,006
Br	0,456	2	0,796	**Bi**	0,693	2	0,707
Rb	13,261	2	0,001	**Th**	1,146	2	0,564
Sr	6,574	2	0,037	**U**	4,628	2	0,099
Y	6,752	2	0,034				

Tablo 5.3: Hierapolis antik ocakları mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizine göre ilk 2 kanonikal ayrışım fonksiyonun eigen değerleri, %varyans ve % kümülatif eigen değerleri

Fonksiyon	Eigen Değeri	% Varyans	%Kümülatif Eigen Değeri	Kanonikal Korelasyon
1	1	3.853	59.2	59.2
2	2	2.656	40.8	100

Ayrışım fonksiyonu analiz sonucuna göre elde edilen 1 ve 2 numaralı fonksiyonlar kullanılarak hazırlanan dağılım grafiği şekil 5.11'de verilmiştir. Dağılım grafiğinde Hierapolis antik ocakları mermer türlerinin başarılı bir şekilde birbirinden ayrıldığı, kimyasal bileşim açısından beyaz renkli, beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli mermer örnekleri arasında belirgin farklılık olduğu görülmektedir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11: Hierapolis antik ocakları mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak ayrışım fonksiyon analizi ile iki boyutta kümelenmesi

5.1.5 Hierapolis antik ocakları mermer örneklerinin duraylı izotop (C ve O) jeokimyası

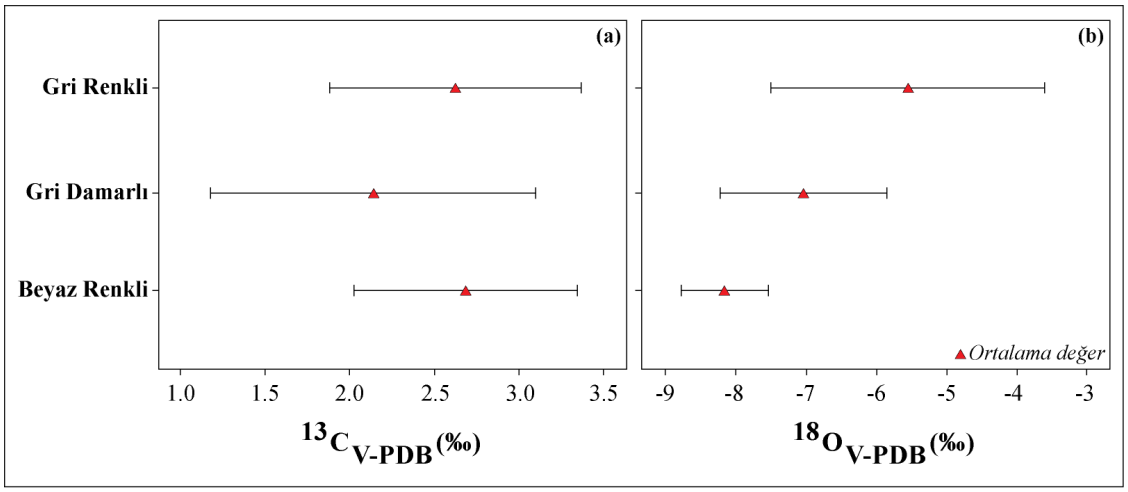
Arazi gözlemleri, mineralojik-petrografik ve jeokimyasal incelemelerin anlatıldığı bölümlerde, Hierapolis ocaklarındaki mermer örnekleri 3 farklı gruba ayrılmıştı. Mermer gruplarının C ve O izotop değerlerini belirlemek amacıyla; her bir mermer grubundan 7 adet olmak üzere toplam 21 adet mermer örneğinin C ve O izotop analizleri yapılmıştır. Örnek gruplarına ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçlar tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4: Hierapolis antik ocakları mermer örneklerine ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçları

Mermer Grubu	Örnek No	$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ (‰)	$\delta^{18}O_{V\text{-}PDB}$ (‰)
Beyaz renkli	HRP-1	3,22	-8,62
	HRP-2	2,57	-8,16
	HRP-7	3,52	-7,32
	HRP-9	2,15	-8,22
	HRP-18	2,09	-9,35
	HRP-19	1,78	-7,82
	HRP-28	3,45	-7,65
Gri damarlı	HRP-3	0,69	-7,67
	HRP-4	0,63	-9,55
	HRP-10	2,66	-5,76
	HRP-21	2,87	-6,40
	HRP-22	2,66	-6,93
	HRP-23	2,40	-6,97
	HRP-24	3,08	-6,00
Gri renkli	HRP-5	3,02	-7,24
	HRP-8	3,06	-4,53
	HRP-11	2,41	-6,19
	HRP-12	3,11	-6,37
	HRP-15	3,12	-6,49
	HRP-16	2,77	-6,84
	HRP-29	0,90	-1,21

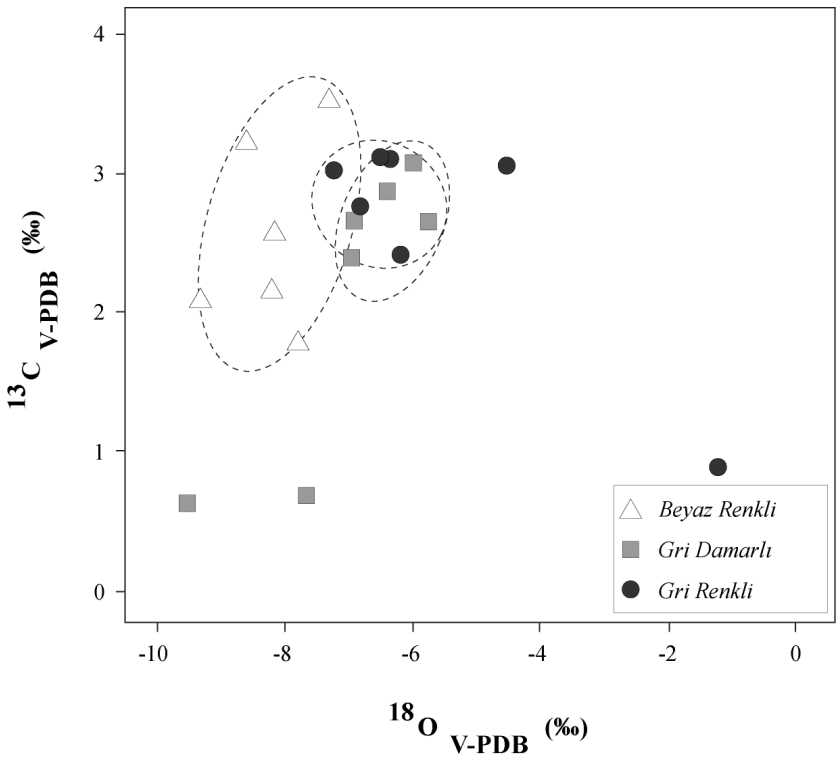
C ve O izotop değerlerinin mermer gruplarındaki dağılımları şekil 5.12'de görülmektedir. Duraylı izotop analizleri sonucunda $\delta^{13}C$ izotop değerlerinin beyaz renkli mermer örneklerinde 1.78-3.52, gri damarlı mermer örneklerinde 0.63-3.08 ve gri renkli mermer örneklerinde 0.90-3.12 arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 5.12.a). Benzer olarak $\delta^{18}O$ izotop değerleri beyaz renkli mermer örneklerinde (-9.35)-(-7.32), gri damarlı mermer örneklerinde (-9.55)-(-5.76) ve gri renkli mermer örneklerinde (-7.24)-(-1.21) arasında değişim göstermektedir (Şekil 5.12.b).

Diyagramlarda beyaz renkli mermer örneklerinin O izotop değerlerinin, gri damarlı ve gri renkli mermer örneklerinin O izotop değerlerine göre daha sınırlı bir dağılım aralığına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.12: Hierapolis antik ocakları mermer gruplarının a) C izotop, b) O izotop değerleri dağılım grafikleri

Hierapolis antik ocakları mermer örnekleri $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında birkaç örnek dışında C ve O izotop değerleri bakımından birbirine yakın alanlarda kümelendikleri görülmüştür (Şekil 5.13). Özellikle gri damarlı ve gri renkli mermer örneklerinin C ve O izotop değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

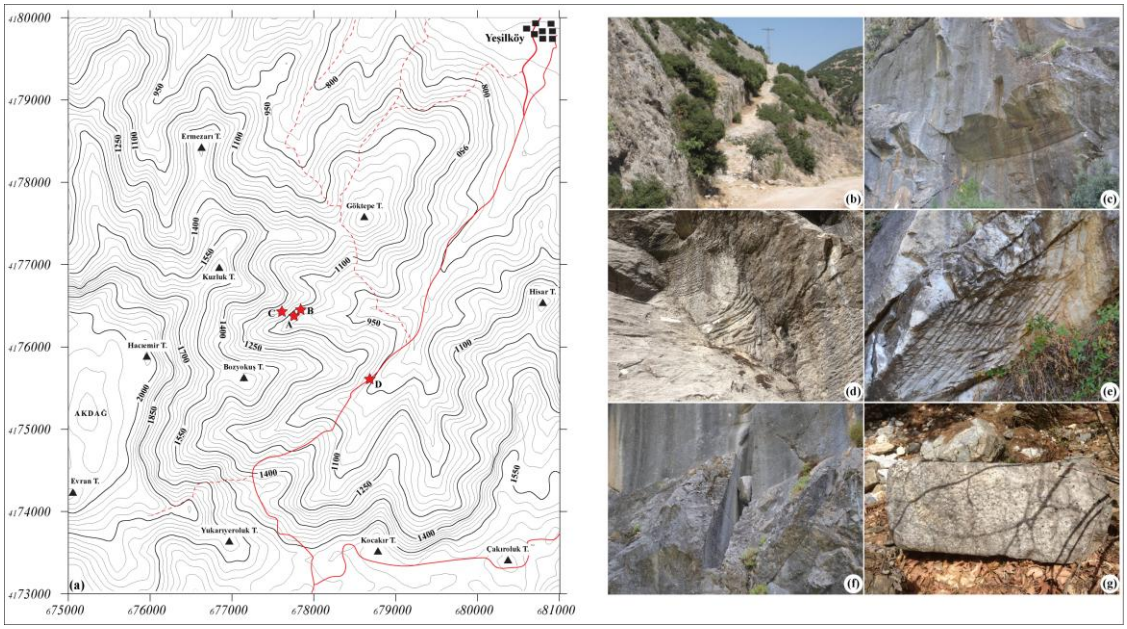


Şekil 5.13: Hierapolis antik ocakları mermer türlerinin $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramındaki dağılımları

5.2 Domuzderesi (Yeşilköy) Antik Ocaklarının Jeolojik Yapısı

Domuzderesi antik mermer ocakları Yeşilköy ile Akdağ yakınında, Denizli il merkezinin 6 - 7 km uzağında bulunmaktadır (Şekil 5.14.a). Domuzderesi antik ocaklarının varlığı ilk defa Monna ve Pensabene (1977) tarafından ortaya çıkarılmıştır. Araştırmacılar bölgede en az 32 adet antik ocağın ve bu ocaklardan çıkarılan blokların taşınmasında kullanılan oldukça iyi korunmuş antik bir yolun varlığına işaret etmişlerdir (Şekil 5.14.b). Günümüzde bölgenin yoğun maki ve orman örtüsü ile kaplı olması, antik ocakların bulunduğu bölgelerde geçen 10 yıl içerisinde aktif olarak mıcır üretimi yapılan taş ocaklarının varlığı (taş ocakların büyük bir kısmının sözü edilen bu antik ocak aynalarından üretim yaptığı düşünülmektedir) nedeniyle araştırmacıların bahsetmiş olduğu sayıda antik ocağa rastlanılmamıştır. Ancak iyi korunmuş üç adet (A, B, C) antik ocağın varlığı belirlenmiştir (Şekil 5.14.a). Harita D ile gösterilen dördüncü ocağın aynasındaki izler diğer üç ocağa göre belirgin değildir. Buranın antik bir ocak olduğunu düşündüren en önemli veri yamaç üzerinde sütun şeklinde çukur bir yapının varlığıdır. D ocağının yakınlarında açılmış güncel bir ocak içerisinde lila-mor

damarlı mermer bloğu görülmüştür. Bu örnek dışında bölgedeki hiçbir ocakta lila-mor damarlı mermerlere rastlanılmamıştır. Belirlenen ocaklara ulaşım için Yeşilköy mahallesinin yakınındaki antik yoldan derin vadi içerisine inilmesi ve Domuzderesi içerisinden giden stablize orman yolunun takip edilmesi gerekmektedir. İyi korunmuş 3 adet antik ocak derin vadinin sağ ve sol yamaçlarında açılmış olup, ocak aynalarında blok, sütun çıkarmak amacıyla kesici ve delici aletler kullanılmasından kaynaklanan farklı yönlerde keski izleri oldukça belirgin olarak görülmektedir (Şekil 5.14.c, d, e). Bununla birlikte ana kaya kütlesi üzerinde sütun çıkarmak amacıyla açılmış köşeli oyuklar, ocaklara yakın vadi tabanında yarı işlenmiş köşeli blok parçaları görülmektedir (Şekil 5.14.f, g).



Şekil 5.14: Domuzderesi antik ocaklarının konumu ve arazi görünümleri a) Domuzderesi antik ocaklarının yerini gösteren topoğrafik harita b) ocaklara giden antik yol c, d, e) ocak aynalarında görülen farklı yönlerdeki keski izleri f) ocak aynasında sütun çıkarmak amacıyla açılmış köşeli oyuk g) vadi tabanında görülen yarı işlenmiş blok

Domuzderesi antik mermer ocakları Okay (1986) tarafından tanımlanan Denizli birimi içerisinde bulunmaktadır. Denizli birimi, mermer, bantlı mermer, çörtlü mermer, klorit - grafit şist, meta-kuvarsit'ten oluşur ve Denizli ilinin güneyinde Ortaca Dağı'nın kuzey yamaçları boyunca yaygın yüzlekler vermektedir. Denizli birimi tektonik dokanakla Ortaca Dağı birimi'nin ve bazı bölgelerde Göbecik Tepe birimi'nin altında yer almaktadır. Bununla birlikte Denizli birimi'nin alt dokanağı gözlenmemiştir (Okay 1986). Metamorfizma ve kuvvetli deformasyon nedeniyle

Denizli birimi kendi içerisinde büyük ve orta ölçekte monoklinal kıvrımlanmalar göstermektedir. Bu nedenle birimin düzenli bir stratigrafisini kurmak güçtür. Denizli biriminin büyük bir kısmını beyaz, açık gri, koyu gri - siyah renkli, bantlı ve yer yer şeker dokulu mermerler oluşturmaktadır. Farklı renkte görülen bu mermerler arasında ince seviyeler halinde yeşil renkli klorit şist ve koyu gri renkli grafit şistler bulunur. Menderes Masifi ve Tavas Biriminin Mesozoyik karbonatlarında bu tip ardalanmalara hiç rastlanmaz. Tekkeköy (Denizli) güneyinde mermerlerin altında (muhtemelen stratigrafik olarak üstünde) 0.1-2 cm kalınlıkta beyaz, açık gri, çört bantlı mermerler yer alır. Kınıklı (Denizli) Köyü'nün güneyinde, muhtemelen stratigrafik olarak daha üst seviyelere tekabül eden yeşil, kirli sarı mikaşist, kalkşist ve kuvarsitler bulunur. Tamamen rekristalize olmuş sedimanter kayalardan oluşan Denizli biriminde fosil bulunamamıştır (Okay, 1986).

5.2.1 Domuzderesi ocaklarındaki mermerlerin makroskopik özellikleri

Domuzderesi antik ocaklarından beyaz, beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli olmak üzere toplam 44 adet örnek alınmıştır. Genel anlamda Hierapolis mermer özellikleriyle benzer özellikler gösteren Domuzderesi örneklerinin makroskopik özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

Beyaz renkli mermerlerin atmosfer ile etkileşim halinde bulunan yüzeyleri genellikle koyu gri - siyah ile kahverengimsi siyah renklerde olup, taze kırık yüzeyleri beyaz renklidir (Şekil 5.15.a, b). Ocakların bazı kesimlerinde (özellikle kırık hatlarına yakın olan yerlerde) mekanik ve iklimsel faktörlerin etkisiyle meydana gelen yapısal bozulmalar (şekerlenme) görülmektedir. Beyaz renkli mermer örnekleri renk olarak homojen bir görünümde olup, bileşenlerin tane boyutu orta-iri (2-5 mm) arası büyüklüktedir. Beyaz renkli mermerleri oluşturan bileşenler camsı parlaklığa sahip olup, kristal yüzeyleri güneş ışığı altında parlamaktadır. Özellikle yapısal bozunmaya uğramış örneklerin kolaylıkla ufalandıkları ve dağıldıkları görülmektedir.

Beyaz renkli mermerler ile ardalanmalı olarak görülen beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin en tipik özelliği zig zag şeklinde gelişmiş damarlı bir yapı göstermesidir (Şekil 5.15.c). Damarlar gri - koyu gri renkli olup, çoğunlukla düzensiz bir yapı göstermektedir. Damar genişlikleri 0.03-0.1 cm arasında değişmektedir. Gri damarlı mermer örneklerinin tane boyutları ince-orta (100µm-5mm) arasında

değişmekte olup, bazı iri kristal yüzeyleri güneş ışığı altında parlamaktadır (Şekil 5.15.d).

Şekil 5.15: Domuzderesi ocakları mermer örneklerinin arazi ve el örneklerinin görünümleri a, b) beyaz renkli mermerlerin arazi ve el örneğinin c, d) beyaz renkli gri damarlı mermerlerde görülen zig-zag şekilli damar yapıları ve el örneğinin e, f) orta-kalın tabakalı yapı gösteren gri renkli mermerlerin arazi ve el örneğinin görünümleri

Arazide orta-kalın tabakalanma gösteren gri renkli mermer örneklerinin taze kırık yüzeyleri koyu gri - siyahımsı gri renklidir (Şekil 5.15.e). Tabaka duruşları tektonizma nedeniyle farklılık göstermektedir. Gri renkli mermer örneklerini oluşturan bileşenler çıplak gözle kolaylıkla görülmektedir. Kristal boyutları genellikle ince-orta (100µm-5mm) arasında değişmekte olup, kristal yüzeyleri güneş ışığı altında parlamaktadır (Şekil 5.15.f). Gri renkli mermer örnekleri içerisinde beyaz renkli, çeşitli genişlikte ve iri kalsit kristalleri tarafından doldurulmuş damar yapıları görülmektedir.

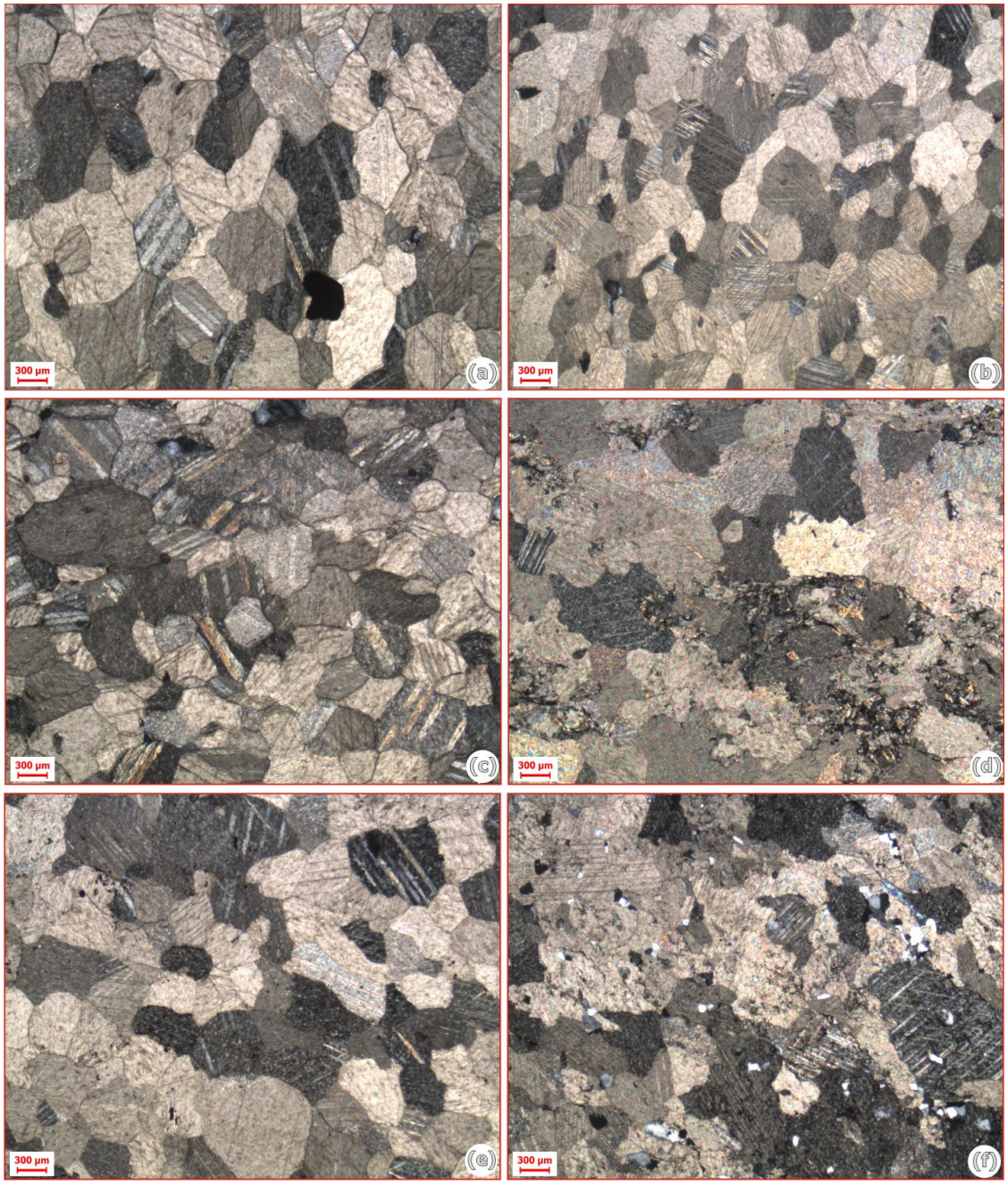
5.2.2 Domuzderesi ocaklarındaki mermelerin mikroskopik özellikleri

A, B, C ve D numaralı ocaklardan alınan mermer örneklerinin mineralojik bileşimi ve dokusal özelliklerini belirlemek amacıyla 44 adet örnek üzerinde petrografik incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Beyaz renkli mermer örnekleri homoblastik poligonal doku özelliği göstermektedir (Şekil 5.16.a). Kristal sınır şekilleri düzgün olup daha küçük kristallerde mozaik doku belirgindir. Bazı örneklerde yer yer körfez yapıları da gözlenmiştir. Mermer örnekleri baskın olarak karbonat (kalsit, dolomit) minerallerinden oluşmaktadır. DDR-10 ve DDR-11 numaralı örneklerde yuvarlaklaşmış taneler şeklinde kuvars, piroksen ve iğnemsi kristaller halinde muskovit mineralleri gözlenmiştir. Karbonat minerallerinde polisentetik ikizlenmeler yaygın olarak görülmektedir (Şekil 5.16.b). Karbonat mineralleri çoğunlukla özşekilli-yarı özşekilli kristaller halinde olup, kristal boyutları 286-1830 µm arasında değişim göstermektedir. Karbonat minerallerinde rombohedral dilinim izleri belirgin olup, dilinim açısı 34º-56º arasındadır.

Beyaz renkli gri damarlı mermer örnekleri heteroblastik poligonal dokuda olup, karbonat mineralleri (kasit, dolomit), daha az oranda kuvars, piroksen ve muskovit minerallerden oluşmaktadır (Şekil 5.16.c). Bazı mermer örneklerinin heteroblastik mozaik dokuda oldukları belirlenmiştir (Şekil 5.16.d). Karbonat minerallerinde polisentetik ikizlenmeler yaygın olarak görülmektedir. DDR-2, DDR-13 ve DDR-21 örneklerinde karbonat minerallerine ek olarak kuvars, piroksen ve muskovit minerallerine de rastlanmıştır. Karbonat mineralleri çoğunlukla yarı özşekilli-özşekilsiz kristaller halinde olup, kristal boyutları 269-4154 µm arasında

değişmektedir. İri karbonat minerallerinde rombohedral dilinim izleri belirgin olup, dilinim açısı 36º-57º arasında değişmektedir.



Şekil 5.16: Domuzderesi mermer örneklerinin mikroskop görüntüleri a, b) beyaz renkli mermer örneklerinde görülen homolastik poligonal doku, karbonat minerallerinde gözlenen rombohedral dilinim izleri ve polisentetik ikizlenmeler, beyaz renkli gri damarlı mermerlerde görülen c) heteroblastik poligonal doku d) heteroblastik mozayik doku ve muskovit mineralleri, gri renkli mermerlerde gözlenen e) heteroblastik poligonal f) heteroblastik mozayik doku ve yuvarlaklaşmış kuvars mineralleri

Gri renkli mermer örnekleri heteroblastik poligonal dokuda olup, egemen olarak karbonat mineralleri (kalsit, dolomit) ve kuvars minerallerinden oluşmaktadır (Şekil 5.16.e). Ancak bununla birlikte bazı kesitler tipik olarak heteroblastik mozaik doku göstermektedir. Özellikle mozaik doku gösteren kesitlerde bol miktarda yuvarlaklaşmış kuvars mineralleri yaygın olarak görülmüştür (Şekil 5.16.f). DDR-35, DDR-42 ve DDR-43 numaralı örneklerde karbonat mineralleri yanında piroksen minerallerine de rastlanmıştır. Karbonat mineralleri çoğunlukla özeşekilsiz kristaller halinde olup, kristal boyutları 305-1961 µm arasında değişmektedir. Gri renkli mermerleri oluşturan bileşenler tipik olarak yönlenme göstermektedir. Dilinim açıları çok belirgin olmayıp 38º-55º arasında değişmektedir. Karbonat minerallerinde polisentetik ikizlenmeler gözlenmiştir.

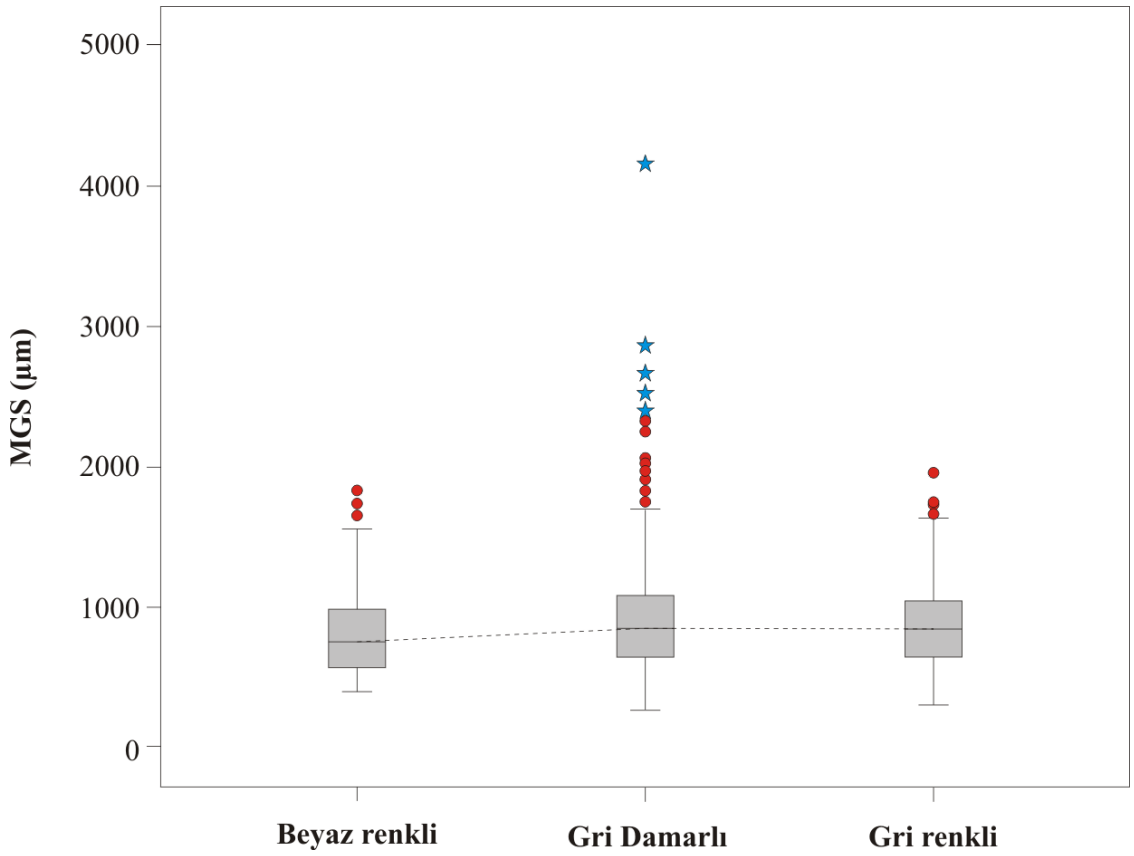
5.2.2.1 Domuzderesi antik ocakları mermer örneklerinin MGS ölçümleri

Domuzderesi A, B ve C numaralı antik ocaklardan alınan mermer örneklerinin incekesitleri üzerinde tane boyu ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyu ölçümlerinde kristallerin uzun eksenleri boyunca ölçümlerin alınmasına dikkat edilmiştir. Ölçüm sonuçları tablo 5.5' de verilmiştir.

Tablo 5.5: Domuzderesi mermer türleri MGS ölçüm sonuçları

Mermer Türü	**Tane Boyutu (µm)**			
	Minimum	**Maksimum**	**Ortanca**	**Standart sapma**
Beyaz renkli	286,525	1830,005	759,281	303,426
Gri damarlı	269,304	4154,367	856,037	475,654
Gri renkli	304,721	1960,937	844,771	303,427

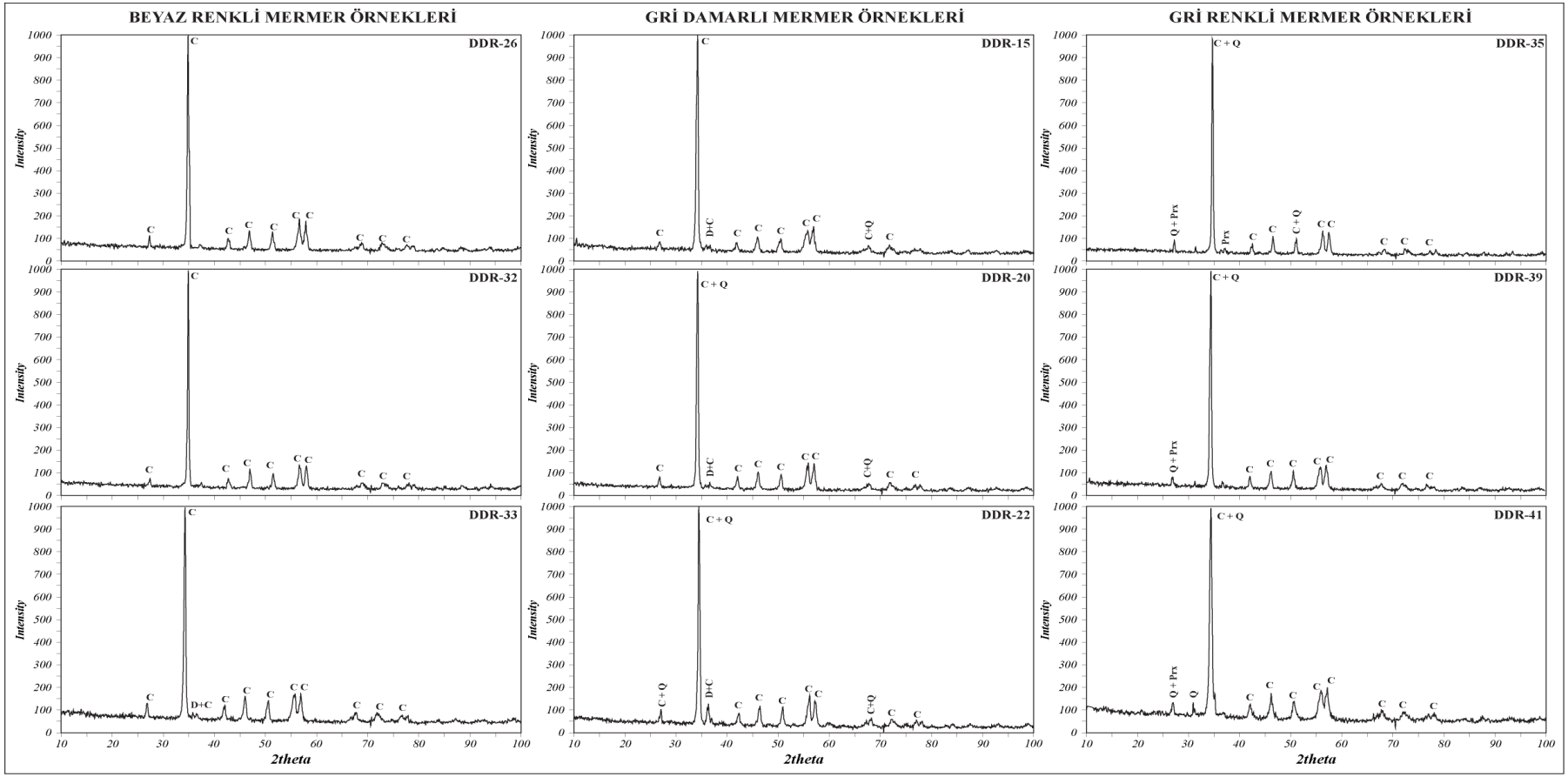
MGS ölçümlerine göre Domuzderesi mermer örneklerinin birbirine yakın değerlere sahip olduğu gözlenmiştir. Bu bakımdan domuzderesi mermer örnekleri homojen bir dağılım göstermektedir (Şekil 5.17). Şekil 5.17'ye göre en fazla dışlak değer beyaz renkli gri damarlı mermer gruplarında gözlenmekte olup, beyaz ve gri renkli mermer grupları aynı standart sapma değerlerini verdiği belirlenmiştir.



Şekil 5.17: Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin MGS ölçümlerini gösteren kutu grafikleri

5.2.3 Domuzderesi antik ocakları mermer örneklerinin XRD incelemeleri

Optik mikroskop çalışmaları ile türü belirlenemeyen karbonat minerallerini (kalsit, dolomit) tanımlamak ve mermer örnekleri içerisindeki farklı bileşenleri belirleyebilmek için farklı renk ve doku özelliği gösteren 9 adet mermer örneği üzerinde XRD çalışması yapılmıştır. Farklı renklere sahip mermer örneklerinin XRD grafiklerinde benzer desen ilişkileri gösterdikleri belirlenmiştir. Tüm kayaç toz XRD sonuçlarına göre; beyaz renkli mermer örneklerinde kalsit, gri damarlı mermer örneklerinde baskın olarak kalsit, daha az miktarda dolomit ve kuvars, gri renkli mermer örneklerinde kalsit piklerine ek olarak piroksen (ojit) ve kuvars piklerinin varlığı belirlenmiştir (Şekil 5.18). Mermer örneklerini oluşturan bileşenlerin büyük oranda karbonat minerallerinden oluştuğu düşünüldüğünde daha az miktarda bulunan farklı minerallere (kuvars, piroksen gibi) ait piklerin maskelenmiş olması doğal bir sonuçtur.



Şekil 5.18: Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin XRD grafikleri

5.2.4 Domuzderesi ocaklarındaki mermer örneklerinin jeokimyasal özellikleri

Petrografik ve XRD çalışmalarında farklılıkları belirlenen mermer örneklerinin jeokimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla ana ve iz element analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarının kutu grafikler kullanılarak yorumlaması yapılmış ve mermer örneklerinin kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Domuzderesi mermer örneklerine ait jeokimyasal analiz sonuçları ek C.1'de verilmiştir.

5.2.4.1 Ana ve iz element özellikleri

Domuzderesi mermer örnekleri Na_2O (%) içeriği bakımından farklı dağılım desenlerine sahip olup, örnek grupları asimetrik dağılım göstermektedir (Şekil 5.19). DDR-15 (gri damarlı) numaralı mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır.

MgO (%) içerikleri bakımından beyaz renkli mermer örneklerinden gri damarlı ve gri renkli mermer örneklerine doğru belirgin bir artış görülmektedir. Gri damarlı ve gri renkli mermer örneklerinin benzer dağılım aralıklarına sahip olup, beyaz renkli mermer örnekleri oldukça sınırlı dağılım göstermektedir (Şekil 5.19). Ayrıca gri renkli mermer örnekleri simetrik (homojen) bir dağılıma sahiptir. DDR-33 numaralı beyaz renkli mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır.

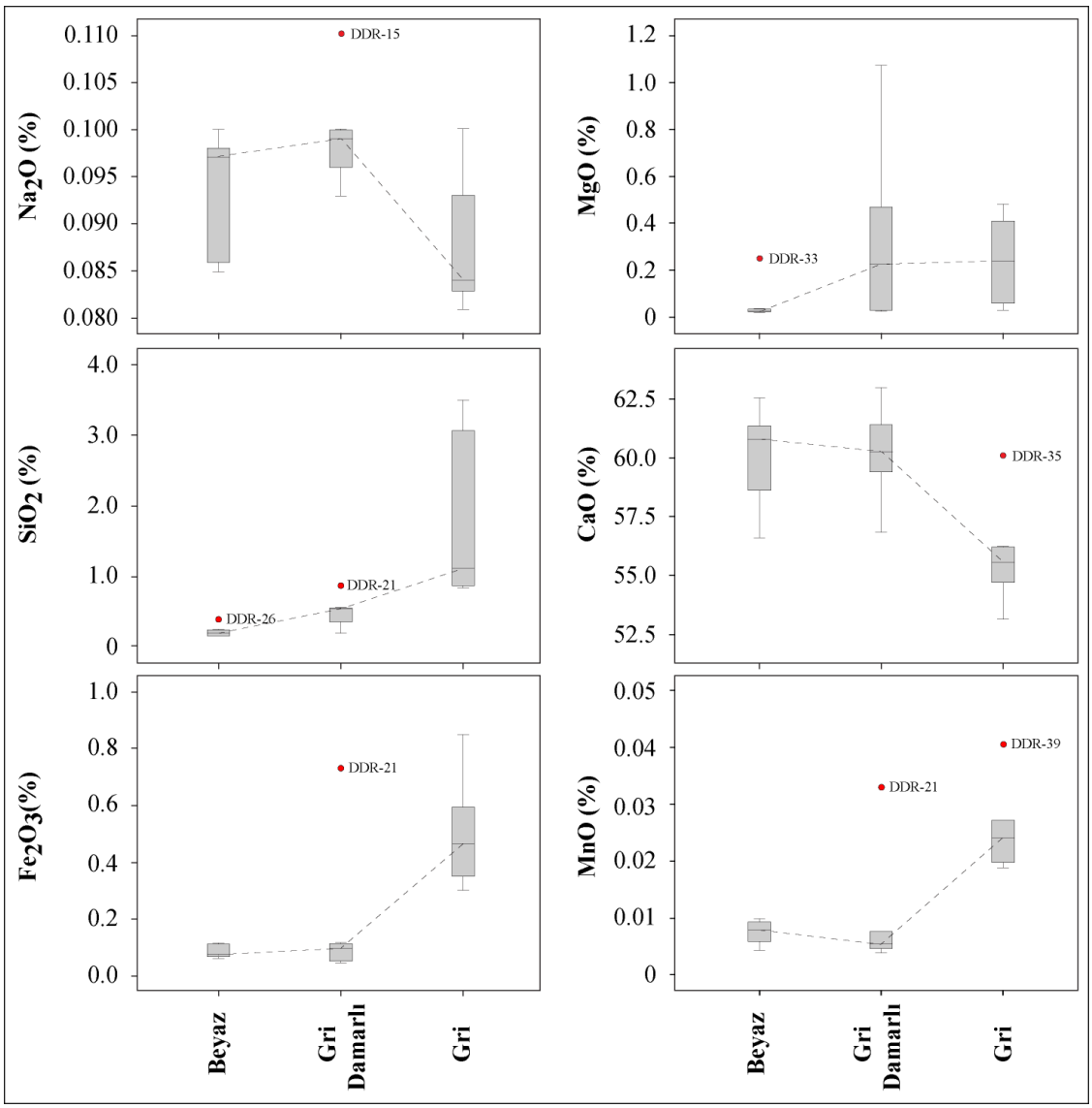
SiO_2 (%) içeriği bakımından beyaz renkli mermer örneklerinden gri renkli mermer örneklerine doğru bir artış görülmektedir. Beyaz renkli mermer örneklerinin SiO_2 (%) içeriği oldukça sınırlı bir dağılım gösterirken, gri renkli mermerlerin SiO_2 (%) içeriği geniş bir dağılım aralığı göstermektedir (Şekil 5.19). Bununla birlikte DRR-26 (beyaz renkli) ve DDR-21 (gri damarlı) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır.

CaO (%) içerikleri bakımından beyaz renkli mermerlerden gri renkli mermer örneklerine doğru belirgin bir azalma görülmektedir. Bununla birlikte beyaz ve gri damarlı mermer örneklerinin benzer CaO (%) içeriklerine sahip oldukları belirlenmiştir (Şekil 5.19). Gri renkli mermer örnekleri simetrik (homojen) bir dağılım göstermekte olup, DDR-35 (gri renkli) mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır.

Beyaz ve gri damarlı mermer örnekleri Fe_2O_3 (%) içeriği bakımından birbirine yakın dağılım aralıklarına sahiptirler. Gri renkli mermer örneklerinin Fe_2O_3 (%) içeriği

diğer mermer gruplarına göre daha yüksek değerlerde olup, simetrik (homojen) dağılım göstermektedir (Şekil 5.19). DDR-21 (gri damarlı) numaralı mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır.

MnO (%) içeriği bakımından beyaz ve gri damarlı mermer örnekleri benzer dağılım aralıklarına sahip olup, gri renkli mermerler belirgin farklılık göstermektedir (Şekil 5.19). DDR-21 (gri damarlı) ve DDR-39 (gri renkli) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır.



Şekil 5.19: Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin bazı ana oksit element içeriklerini gösteren kutu grafikleri

Domuzderesi beyaz ve gri damarlı mermer örneklerinin Zn (ppm) içerikleri birbirine yakın dağılım aralığına sahiptir. Gri renkli mermer örneklerinin Zn (ppm) içeriği diğer mermer gruplarına göre daha geniş ve aynı zamanda simetrik (homojen) bir dağılım aralığı göstermektedir (Şekil 5.20). DDR-27 (beyaz) ve DDR-21 (gri damarlı) numaralı örnekler dışlak değerleri oluşturmaktadır.

Sr (ppm) içeriği bakımından beyaz renkli mermer örneklerinden gri renkli mermer örneklerine doğru belirgin bir artış görülmektedir (Şekil 5.20). Beyaz renkli ve gri damarlı mermer örnekleri sınırlı dağılım aralığı gösterirken, gri renkli mermer örnekleri geniş dağılım aralığı göstermektedir. DDR-26 (beyaz) ve DDR-22 (gri damarlı) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır.

Y (ppm) içerikleri bakımından mermer grupları değişken dağılım göstermektedir. Gri renkli mermer grupları beyaz ve gri damarlı mermer gruplarına göre daha geniş dağılım aralığına sahiptir. DDR-26 (beyaz), DDR-22 (gri damarlı) ve DDR-39 (gri renkli) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır (Şekil 5.20).

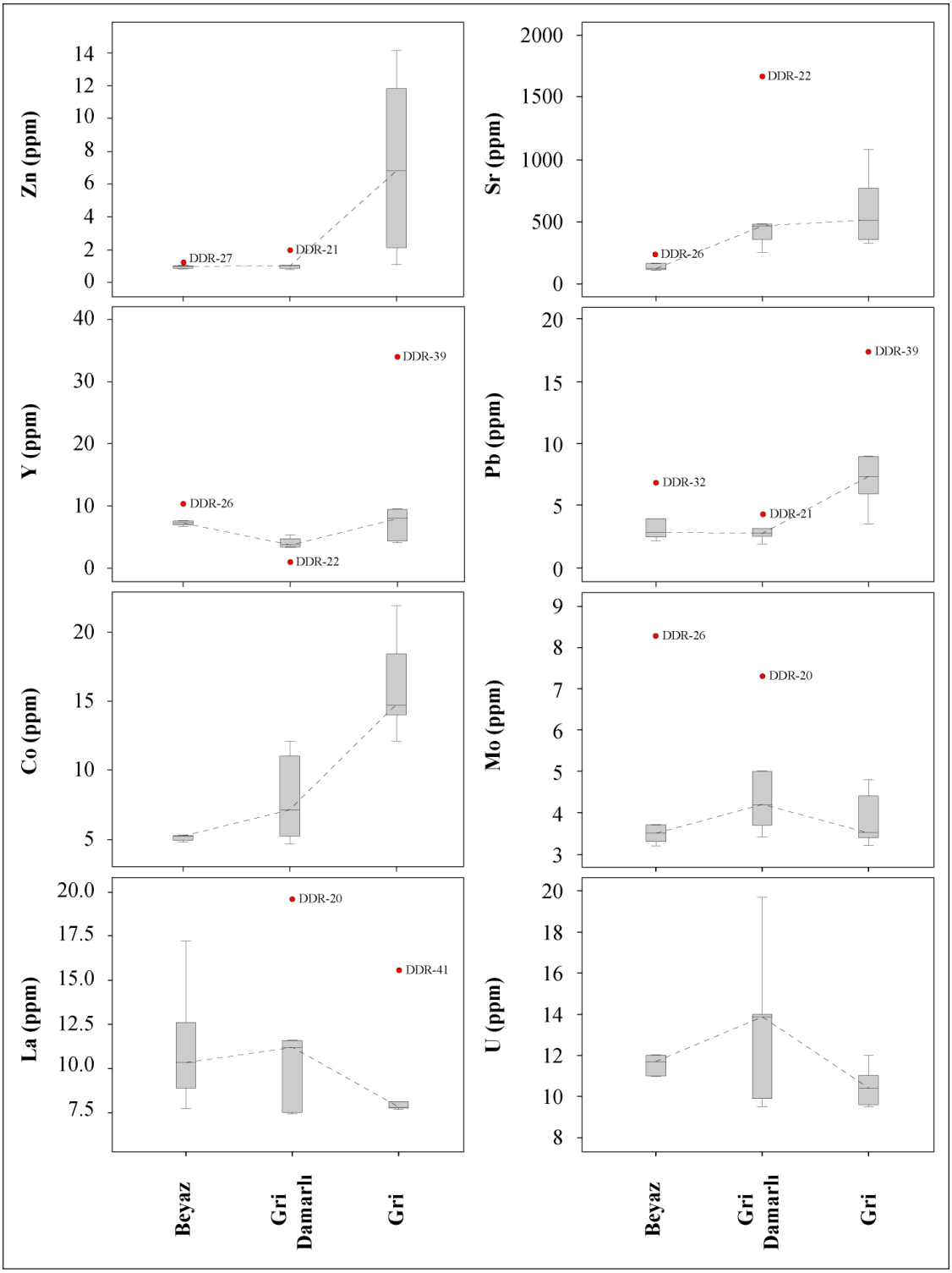
Domuzderesi örneklerinin Pb (ppm) içerikleri beyaz renkli mermer örneklerinden gri renkli mermer örneklerine doğru artış göstermektedir (Şekil 5.20). Pb içeriği bakımından gri renkli mermer örnekleri simetrik (homojen) dağılım sergilemektedir. DDR-32 (beyaz), DDR-21 (gri damarlı) ve DDR-39 (gri renkli) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır.

Co (ppm) içerikleri beyaz renkli mermer örneklerinden gri renkli mermer örneklerine doğru belirgin bir artış göstermektedir (Şekil 5.20). Beyaz renkli mermer örnekleri Co (ppm) içeriği bakımından oldukça sınırlı dağılım aralığına sahipken, gri damarlı ve gri renkli mermer örnekleri geniş dağılım aralıkları göstermektedir.

Mo (ppm) içeriği bakımından beyaz renkli mermer örnekleri simetrik (homojen) dağılım göstermektedir (Şekil 5.20). En geniş dağılım aralığı gri damarlı mermer örneklerinde görülmekte olup, DDR-26 (beyaz) ve DDR-20 (gri damarlı) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır.

Domuzderesi mermer örnekleri La (ppm) içerikleri bakımından değişken dağılım aralıklarına sahiptir. Gri renkli mermer örneklerinin beyaz ve gri damarlı mermer örneklerinden daha düşük La (ppm) değerlerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil

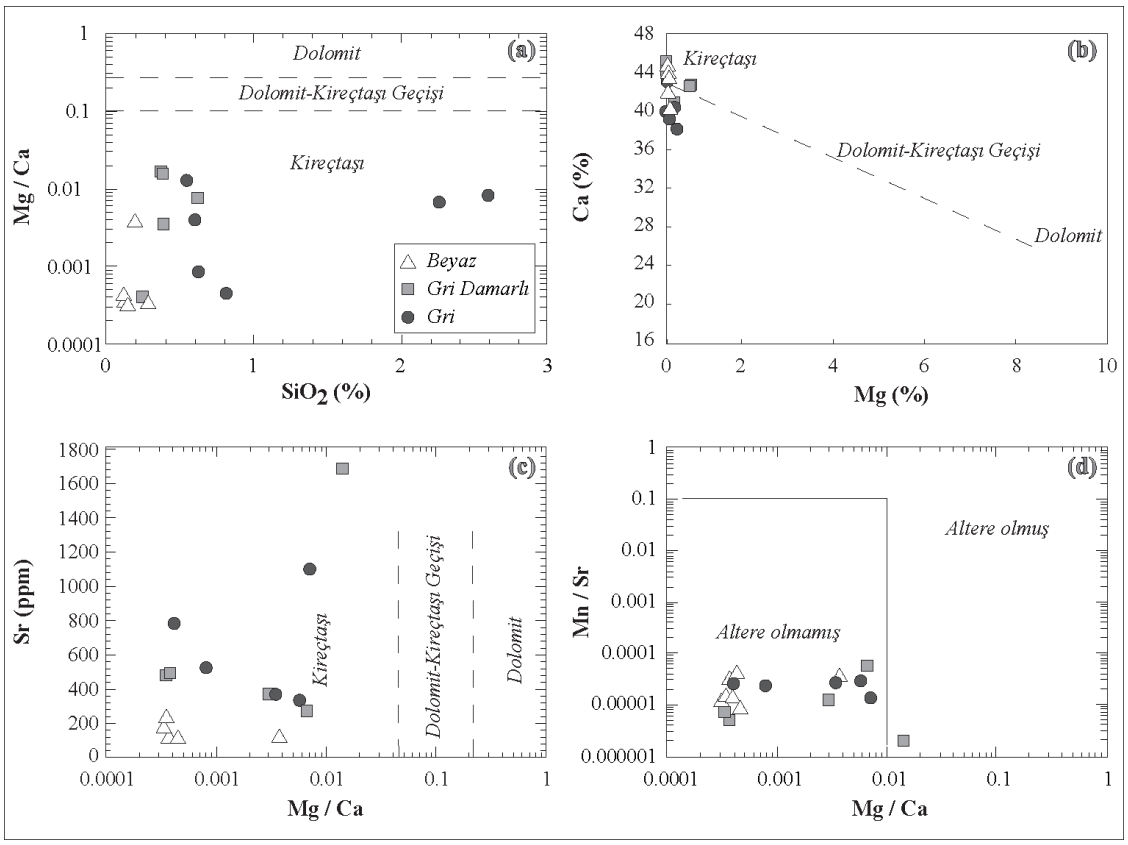
5.20). DDR-20 (gri damarlı) ve DDR-41 (gri renkli) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır.



Şekil 5.20: Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin bazı iz element içerikleri gösteren kutu grafikleri

Gri damarlı mermer örnekleri U (ppm) içerikleri bakımından diğer mermer gruplarına göre daha geniş bir dağılım aralığına sahiptir (Şekil 5.20). Gri renkli mermer örnekleri simetrik (homojen) bir dağılım göstermektedir.

Melezhik ve diğ. (2001) tarafından mermerlerin köken kayasını belirlemek amacıyla geliştirilmiş Mg/Ca-SiO_2 diyagramına yerleştirilen Domuzderesi mermer örneklerinin kireçtaşı alanına düştükleri belirlenmiştir (Şekil 5.21.a). Örneklerin Mg/Ca oranı beyaz renkli mermerlerde 0,00032-0,00366, gri damarlı mermerlerde 0,00036-0,01522 ve gri renkli mermerlerde 0,00043-0,00761 arasında değişmektedir. Gri renkli mermerlerin Mg/Ca oranları diğer mermer türlerine göre daha geniş bir aralıkta değişim göstermektedir.



Şekil 5.21: Domuzderesi mermer türlerinin Melezhik ve diğ. (2001) tarafından geliştirilmiş a) Mg/Ca-SiO_2 (%) b) Ca(%)-Mg(%), c) Sr (ppm)-Mg/Ca ve d) Mn/Sr-Mg/Ca diyagramlarındaki konumları

Ca-Mg diyagramında kireçtaşı-dolomit karışım çizgisi üzerinde, kireçtaşı tarafında kümelenen Domuzderesi mermer örnekleri, Sr-Mg/Ca diyagramında kireçtaşı alanına düşmüşlerdir (Şekil 5.21.b, c). Mermer örneklerinin alterasyon durumunu belirlemek amacıyla oluşturulan Mn/Sr-Mg/Ca diyagramına yerleştirilen Domuzderesi mermer

örnekleri altere olmamış alana düşmektedir (Şekil 5.21.d). Mn/Sr oranı beyaz renkli mermerlerde 0,000018-0,000072, gri damarlı mermerlerde 0,000002-0,000097 ve gri renkli mermerlerde 0,000019-0,000046 arasında değişmektedir.

Sonuç olarak Domuzderesi antik ocakları mermer örneklerinin düşük Sr, Mg/Ca ve Mn/Sr değerlerine sahip oldukları için olasılıkla ilksel izotop oranları değişmemiş örnekleri temsil ettikleri söylenebilir.

5.2.4.2 Kimyasal analiz verilerinin ayrışım fonksiyonu analizi

Domuzderesi antik ocakları mermer örneklerinin kimyasal analiz verilerine uygulanan Kruskal Wallis H testi sonuçları tablo 5.6' da verilmiştir. Kruskal Wallis H anlamlılık testine göre analiz sonucu belirlenen 49 element'ten 18 tanesi (Al_2O_3, SiO_2, P_2O_5, K_2O, CaO, TiO_2, V, Cr, MnO, Fe_2O_3, Co, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Au, Pb) istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur.

Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizi eigen değerleri, % varyans, % kümülatif eigen değeri ve kanonik korelasyon katsayıları tablo 5.7' de gösterilmiştir.

Şekil 5.22 Domuzderesi ocaklarından toplanan mermer örneklerinin iki boyutlu olarak kümelenmesini göstermektedir. Bu dağılım diyagramına göre mermer örnekleri başarılı bir şekilde birbirinden ayrılmaktadır. Kimyasal bileşim açısından beyaz renkli, beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli mermer örnekleri birbirine göre farklılık göstermektedirler

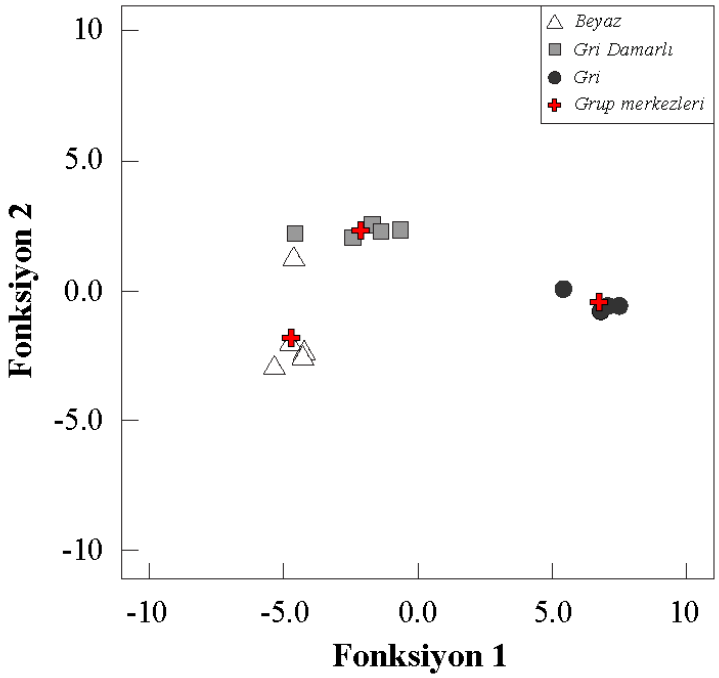
Tablo 5.6: Domuzderesi mermer türlerinin Kruskall Wallis H test sonuçları

Elementler	Ki-Kare	df	p	Elementler	Ki-Kare	df	p
Na_2O	3,97	2	0,137	**Zr**	5,605	2	0,061
MgO	3,892	2	0,143	**Nb**	3,071	2	0,215
Al_2O_3	9,26	2	0,01	**Mo**	1,516	2	0,469
SiO_2	10,64	2	0,005	**Ag**	0,705	2	0,703
P_2O_5	6,023	2	0,049	**Cd**	5,422	2	0,066
SO_3	4,521	2	0,104	**In**	1,753	2	0,416
Cl	0,5	2	0,779	**Sn**	0,327	2	0,849
K_2O	7,922	2	0,019	**Sb**	1,4	2	0,497
CaO	6,66	2	0,036	**Te**	1,106	2	0,575
TiO_2	7,74	2	0,021	**I**	0,705	2	0,703
V	8,188	2	0,017	**Cs**	3,759	2	0,153
Cr	6,752	2	0,034	**Ba**	1,542	2	0,463
MnO	6,66	2	0,036	**La**	0,738	2	0,692
Fe_2O_3	6,74	2	0,034	**Ce**	1,221	2	0,543
Co	9,752	2	0,008	**Hf**	3,356	2	0,187
Ni	2,663	2	0,264	**Ta**	4,792	2	0,091
Cu	0,075	2	0,963	**W**	2,388	2	0,303
Zn	8,144	2	0,017	**Au**	10,195	2	0,006
Ga	3,887	2	0,143	**Hg**	3,173	2	0,205
As	3,757	2	0,153	**Tl**	4,93	2	0,085
Se	3,527	2	0,171	**Pb**	6,74	2	0,034
Br	1,608	2	0,447	**Bi**	3,194	2	0,202
Rb	8,072	2	0,018	**Th**	0,262	2	0,877
Sr	9,42	2	0,009	**U**	2,414	2	0,299
Y	6,66	2	0,036				

Tablo 5.7: Domuzderesi ocağklarındaki mermerlerin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizine göre ilk 2 kanonikal ayrışım fonksiyonun eigen değerleri, %varyans ve % kümülatif eigen değerleri

Fonksiyon	Eigen Değeri	% Varyans	% Kümülatif Eigen Değeri	Kanonikal Korelasyon
1	29.865	89.3	89.3	0.984
2	3.594	10.7	100.0	0.884

.



Şekil 5.22: Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak ayrışım fonksiyon analizi ile iki boyutta kümelenmesi

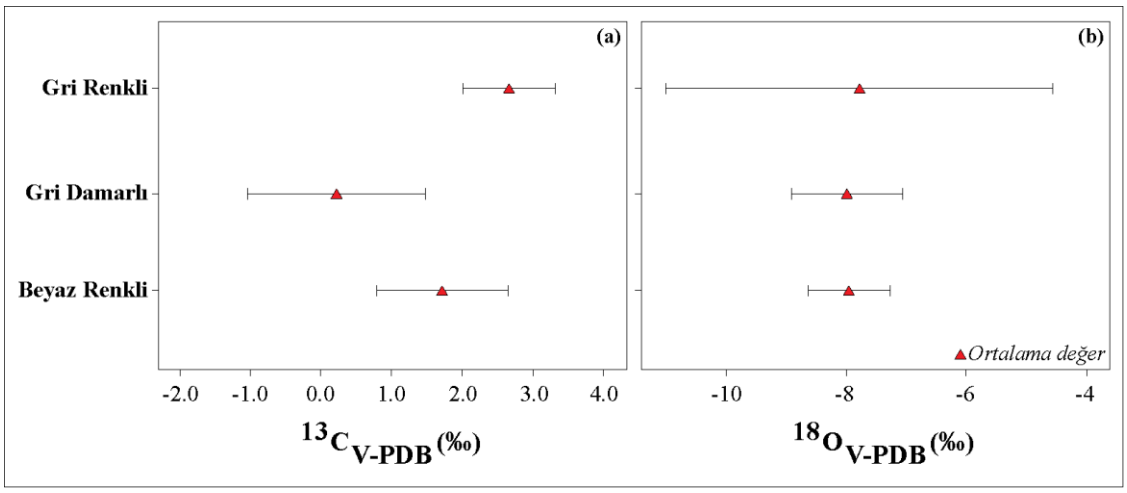
5.2.5 Domuzderesi antik ocakları mermer örneklerinin duraylı izotop (C ve O) jeokimyası

Arazi gözlemleri, mineralojik-petrografik ve jeokimyasal incelemelerin anlatıldığı bölümlerde, Domuzderesi antik ocaklarındaki mermer örnekleri 3 farklı gruba ayrılmıştı. Mermer gruplarının C ve O izotop değerlerini belirlemek amacıyla; her bir mermer grubundan 6 adet olmak üzere toplam 18 adet mermer örneğinin C ve O izotop analizleri yapılmıştır. Örnek gruplarına ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçlar tablo 5.8' de verilmiştir.

Tablo 5.8: Domuzderesi mermer türlerine ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçları

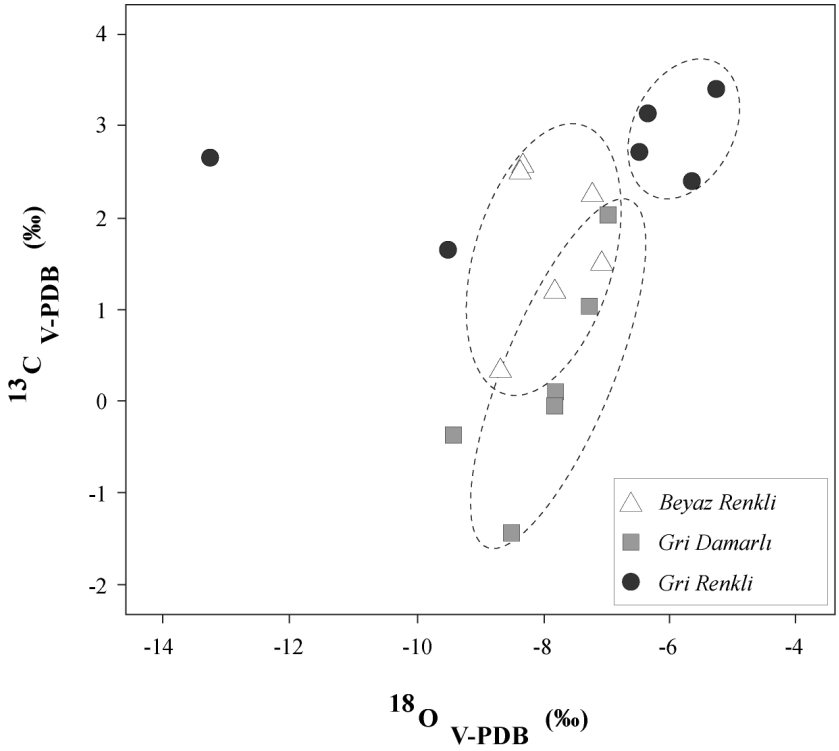
Mermer Grubu	Örnek No	$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ (‰)	$\delta^{18}O_{V\text{-}PDB}$ (‰)
Beyaz renkli	DDR-25	1,19	-7,83
	DDR-26	0,32	-8,70
	DDR-27	2,54	-8,35
	DDR-28	1,49	-7,10
	DDR-32	2,51	-8,39
	DDR-33	2,25	-7,27
Gri damarlı	DDR-15	-1,44	-8,53
	DDR-16	1,03	-7,30
	DDR-19	-0,05	-7,83
	DDR-20	0,10	-7,82
	DDR-21	-0,37	-9,42
	DDR-22	2,03	-7,00
Gri renkli	DDR-35	2,41	-5,67
	DDR-37	2,66	-13,26
	DDR-39	1,64	-9,51
	DDR-41	3,14	-6,39
	DDR-42	3,41	-5,30
	DDR-43	2,73	-6,52

C ve O izotop değerlerinin mermer gruplarındaki dağılımları şekil 5.23' de görülmektedir. Duraylı izotop analizleri sonucunda $\delta^{13}C$ izotop değerlerinin beyaz renkli mermer örneklerinde 0.32-2.54, gri damarlı mermer örneklerinde (-1.44)-2.03 ve gri renkli mermer örneklerinde 1.64-3.41 arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 5.23.a). Benzer olarak $\delta^{18}O$ izotop değerlerinin beyaz renkli mermer örneklerinde (-8.70)-(-7.10), gri damarlı mermer örneklerinde (-9.42)-(-7.00) ve gri renkli mermer örneklerinde (-13.26)-(-5.30) arasında değiştiği görülmüştür (Şekil 5.23.b). C izotop değerleri bakımından mermer gruplarının birbirinden farklı deperlere sahip oldukları, O izotop değerleri bakımdan mermer grupları benzer ortalama değerlerde oldukları görülmektedir. O izotopları gri renkli mermerlerde daha geniş bir dağılım aralığı göstermektedir.



Şekil 5.23: Domuzderesi antik ocakları mermer türlerinin a) C izotop b) O izotop değerleri dağılım grafikleri

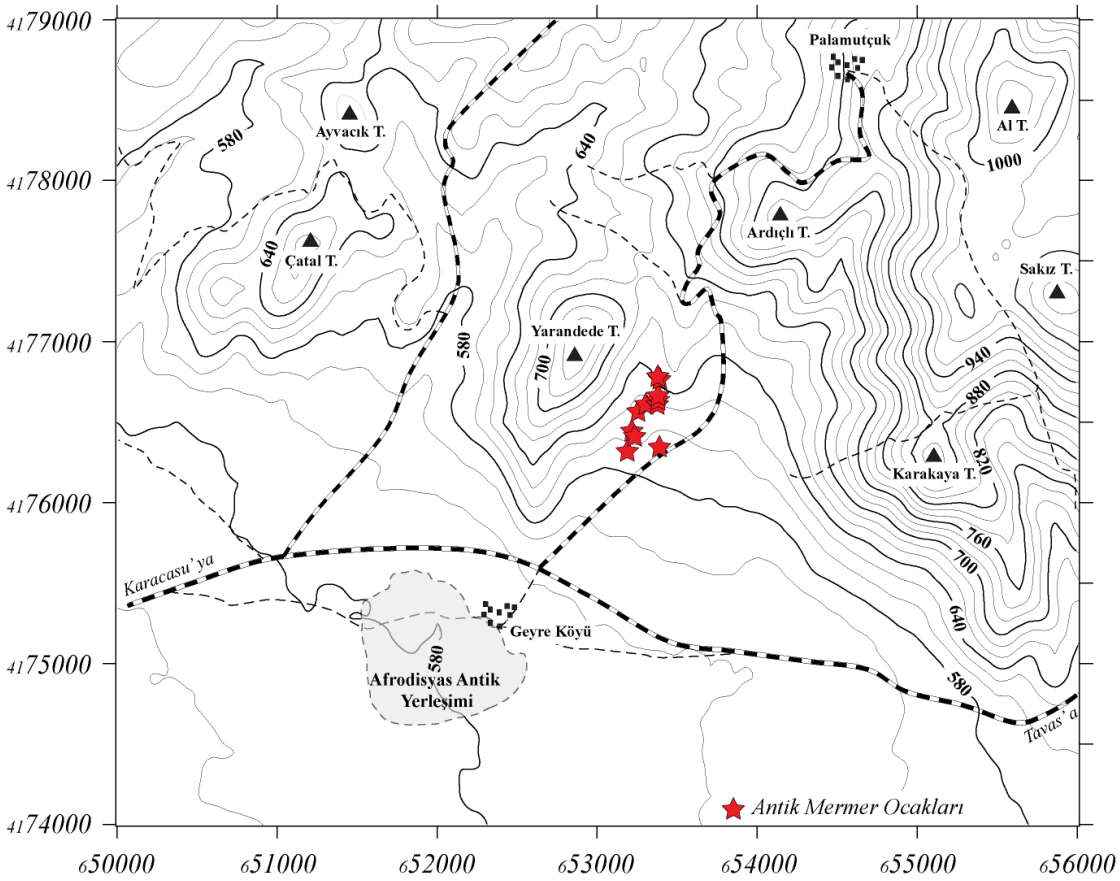
$\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramına yerleştirilen Domuzderesi mermer örneklerinin C ve O izotop değerleri bakımından birbirine yakın kümelenme gösterdikleri görülmektedir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24: $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Domuzderesi ocakları mermer türlerinin dağılımı

5.3 Afrodisias (Karacasu-Aydın) Antik Ocaklarının Jeolojik Yapısı

Afrodisias antik mermer ocakları Karacasu ilçe merkezinin (Aydın) 12 km doğusunda bulunan Afrodisias antik yerleşiminin 2 km KD' sunda yeralmaktadır. Afrodisias antik yerleşimi deniz seviyesinden yaklaşık 520 m yüksekte olup, yaklaşık 494 hektar bir alana yayılmıştır. Afrodisias antik yerleşimi ve çevresine ait güncel ve detaylı çalışmalar (Afrodisias antik şehir yerleşimi ve antik mermer ocaklarına ait haritaları da içermektedir) Rockwell (1996) ve Ponti (1996) tarafından verilmiştir. Antik ocaklara ulaşım oldukça kolay olup, Tavas (Denizli) - Karacasu (Aydın)' ya doğru giden asfalt karayolunu takip etmek gerekir (Şekil 5.25).

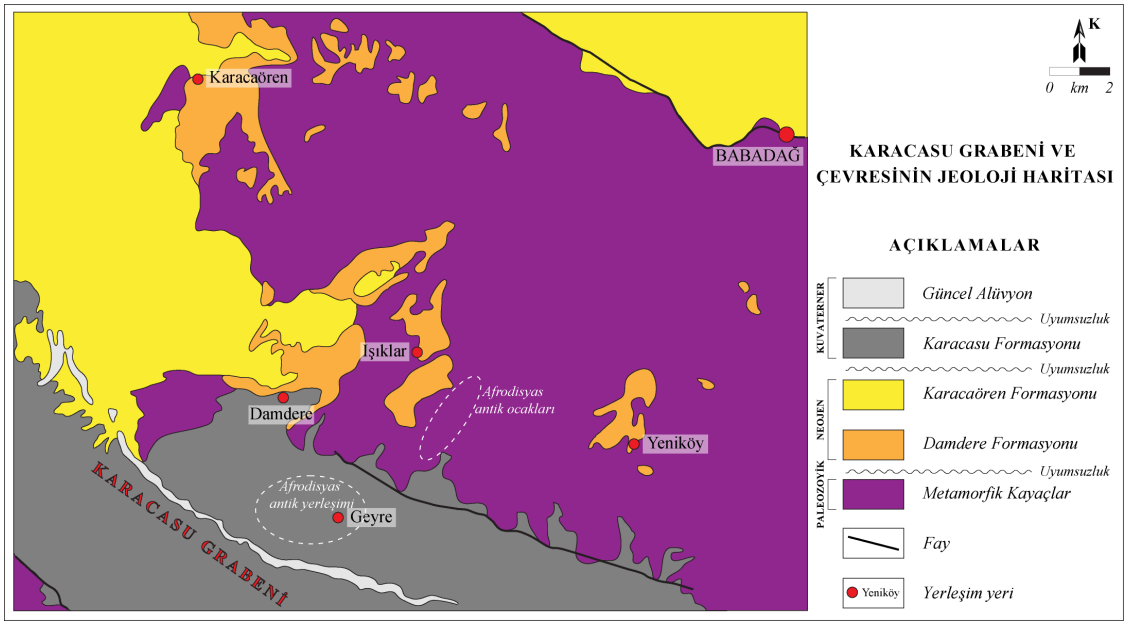


Şekil 5.25: Afrodisias antik ocaklarının yerini gösteren topoğrafik harita

Afrodisias antik ocaklarının coğrafik konumu blok üretimi ve taşınması bakımından oldukça elverişlidir. Antik mermer ocakları toplam 4 km^2' lik bir alana yayılmış olup, Rockwell (1996) ve Ponti (1996) tarafından yapılan çalışmalarda 80 civarında antik ocağın varlığından bahsedilmektedir. Afrodisias antik ocakları yakın geçmişte tahrip edilmeden kalabilmiş, geçmiş dönem mermer üretimi ve işletmeciliği

hakkında önemli bilgilerin edinilebildiği bir sit alanıdır. Keşfinden bu yana aralıksız kazılan Afrodisias antik yerleşiminde, Karia bölgesinin en seçkin heykel sanatçılarının yetiştirildiği bir heykeltraşlık okulu mevcut olup, bu okul için gerekli hammaddelerin Afrodisias antik ocaklarından karşılandığı bilinmektedir.

İnceleme alanı doğusundan ve batısından Neojen öncesi temel kayaçlarından oluşan iki horst ile sınırlanan Karacasu Grabeni içerisinde yeralmaktadır. Neojen ve Kuvaterner yaşlı çökeller graben dolgusu olarak yüzeylenmektedir (Şekil 5.26).

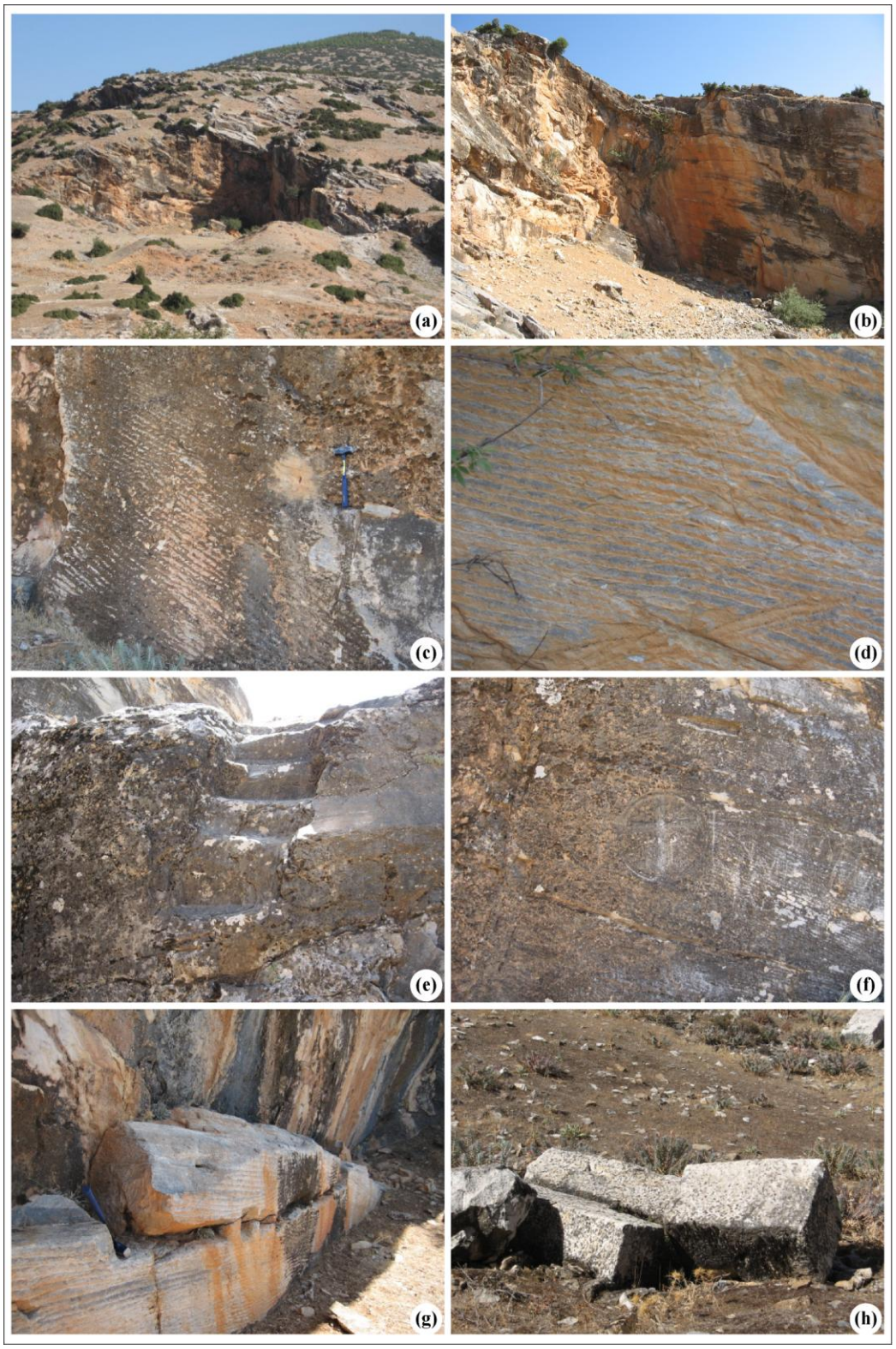


Şekil 5.26: Afrodisias antik yerleşimi, antik mermer ocakları ve çevresinin basitleştirilmiş jeoloji haritası (Açıkalın 2005' den değiştirilerek alınmıştır)

Neojen öncesi temel kayaçları başlıca gnays, şist, kuvarsit ve mermer türü kayaçlardan oluşmaktadır. Daha önceki çalışmalara göre gnayslar iki mikalı olup, bazı yerlerde gözlü gnays olarak tanımlanmıştır. Şist türü metamorfik kayaçlar inceleme alanı ve çevresinde yaygın olarak görülmektedir. Bazı yerlerde granat içerdikleri de gözlenen şistler, çoğunlukla mikaşist karakterindedir. Diğer bir metamorfik kayaç grubu olan kuvarsitler gnays ve şistler kadar yaygın değildirler ve önceki araştırmacılar tarafından, mikaşistler ve gnayslar içinde mercek ve/veya arabantlar halinde bulundukları belirtilmiştir. Tez konusunu oluşturan mermerler sarımsı, beyaz, gri, mavimsi gri ve siyah renklerdedir. Mikaşistler arasında yaygın olarak bulunan ve çoğunlukla mika içeren mermerler bazı yerlerde kalkşist görünümündedir (Kastelli, 1971; Şimşek ve Yılmazer, 1977; Açıkalın, 2005; Alçiçek

ve Jimenez-Moreno, 2013). İnceleme alanında temel kayaçları üzerine birbirinden uyumsuzluk ile ayrılan iki sedimanter istif gelir. Dandalas grubu olarak adlandırılan alttaki istif farklı kayaç topluluklarından oluşan iki litostratigrafi birimine ayrılmıştır. Temel kayaçları üzerinde karasal çökeller (Damdere formasyonu) ile başlayan grup, yukarıya doğru gölsel özellikler sunan bir birime (Karacaören formasyonu) geçer. Dandalas grubu Karacasu formasyonu olarak isimlendirilen, kaba kırıntılı çökellerden oluşan bir başka birim tarafından uyumsuz olarak üzerlenir. Bölgedeki tüm birimler güncel alüvyonlar ile örtülmektedir (Şekil 5.26) (Açıkalın, 2005).

Afrodisias antik ocakları Yarandede tepenin doğusunda kalan sırt boyunca dizilim göstermektedir (Şekil 5.25). Yüzey topoğrafyasında "U" veya hilal şekilli geniş oyuntular şeklinde görülen ocakların aynalarında blok, sütun çıkarmak amacıyla kesici ve delici aletler kullanılmasından kaynaklanan farklı yönlerde keski izleri yaygın olarak görülmektedir (Şekil 5.27.a, b, c, d). İncelenen bölgede büyüklüğü bakımından ana ocak olarak tanımlanabilecek bir ocağın içerisinde üst kotlara çıkabilmek için açılmış merdiven basamakları, işletme sırasında ihtiyaç duyulan su ihtiyacını gidermek amacıyla açılmış su kuyusu ve duvarında işlenmiş haç kabartmasına rastlanılmıştır (Şekil 5.27.e, f). Bununla birlikte bazı ocakların içerisinde yarı işlenmiş blok parçaları ile ana kaya kütlesinden çıkarılmış veya çıkarılması yarım kalmış sütun parçası bulunmaktadır (Şekil 5.27.g, h).



Şekil 5.27: Afrodisias antik ocaklarının arazi görüntüleri a, b) yüzey topoğrafyasındaki görünümleri b, c) ocak aynalarında görülen keski izleri e) ana ocak içerisinde bulunan merdiven basamakları f) ana ocak aynasında görülen haç kabartması g) ana kütleden ayrılmadan bırakılmış sütun yapısı h) ocaklardan çıkarılmış yarı işlenmiş bloklar

5.3.1 Afrodisias (Karacasu-Aydın) antik ocakları mermerlerinin makroskopik özellikleri

Afrodisias antik ocaklarında görülen mermer türlerinin petrografik özelliklerini belirleyebilmek amacıyla beyaz renkli, beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli mermer örneklerinden toplam 27 adet örnek toplanmıştır.

Beyaz renkli mermerlerin taze kırık yüzeyleri beyaz renkli olup, renk olarak homojen bir görünümdedir (Şekil 5.28.a, b). Mermerleri oluşturan bileşenler çıplak gözle kolaylıkla görülmekte olup, tane boyutları orta-iri (2mm->5mm) arasında değişmektedir. Beyaz renkli mermerleri oluşturan bileşenler camsı parlaklığa sahip olup, kristal yüzeyleri güneş ışığı altında parlamaktadır (Şekil 5.28.b). Mermer örnekleri %10'luk HCl asit çözeltisi damlatıldığında oldukça fazla miktarda köpürmektedir. Bu durum örnekleri oluşturan bileşenlerinin çoğunluğunun karbonat minerallerinden (kalsit) oluştuğunu göstermektedir. Bununla birlikte bazı örneklerin taze kırık yüzeylerinde çürük yumurta kokusuna benzer keskin bir koku hissedilmektedir.

Beyaz renkli mermerler ile ardalanmalı olarak görülen beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin kristalleri çıplak gözle ve lupla kolaylıkla görülebilmektedir. Bu tür mermerlerin en karakteristik özelliği damarlı bir yapı göstermesidir. Damarlar gri renkli olup incelenen diğer antik ocaklarda olduğu gibi belirgin değildir. Ayrıca damarlar biribirine paralel düzenli bir yapı göstermektedir (Şekil 5.28.c). Gri damarlı mermer örneklerinin tane boyutları ince-orta (100µm-5mm) arasında değişmekte olup, bazı iri kristal yüzeyleri güneş ışığı altında parlamaktadır (Şekil 5.28.d).

Ocak aynalarında beyaz ve gri damarlı mermerlerin üzerinde görülen gri renkli mermerlerin taze kırık yüzeyleri gri - mavimsi gri renklidir (Şekil 5.28.e, f). Gri renkli mermer örneklerini oluşturan bileşenler çıplak gözle kolaylıkla görülmekte olup, tane boyutları genellikle ince-orta (100µm-5mm) arasında değişmektedir. Gri renkli mermer örnekleri içerisinde beyaz renkli, ince damar yapıları görülmektedir (Şekil 5.28.e).

Şekil 5.28: Afrodisias ocakları mermer örneklerinin arazi ve el örneklerinin görünümleri a, b) beyaz renkli mermerlerin arazi ve el örneğinin c, d) beyaz renkli gri damarlı mermerlerde görülen birbirine paralel damar yapıları ve el örneğinin e, f) gri renkli mermerlerin arazi ve el örneğinin görünümleri

5.3.2 Afrodisias Antik Ocakları Mermer Örneklerinin Mikroskopik Özellikleri

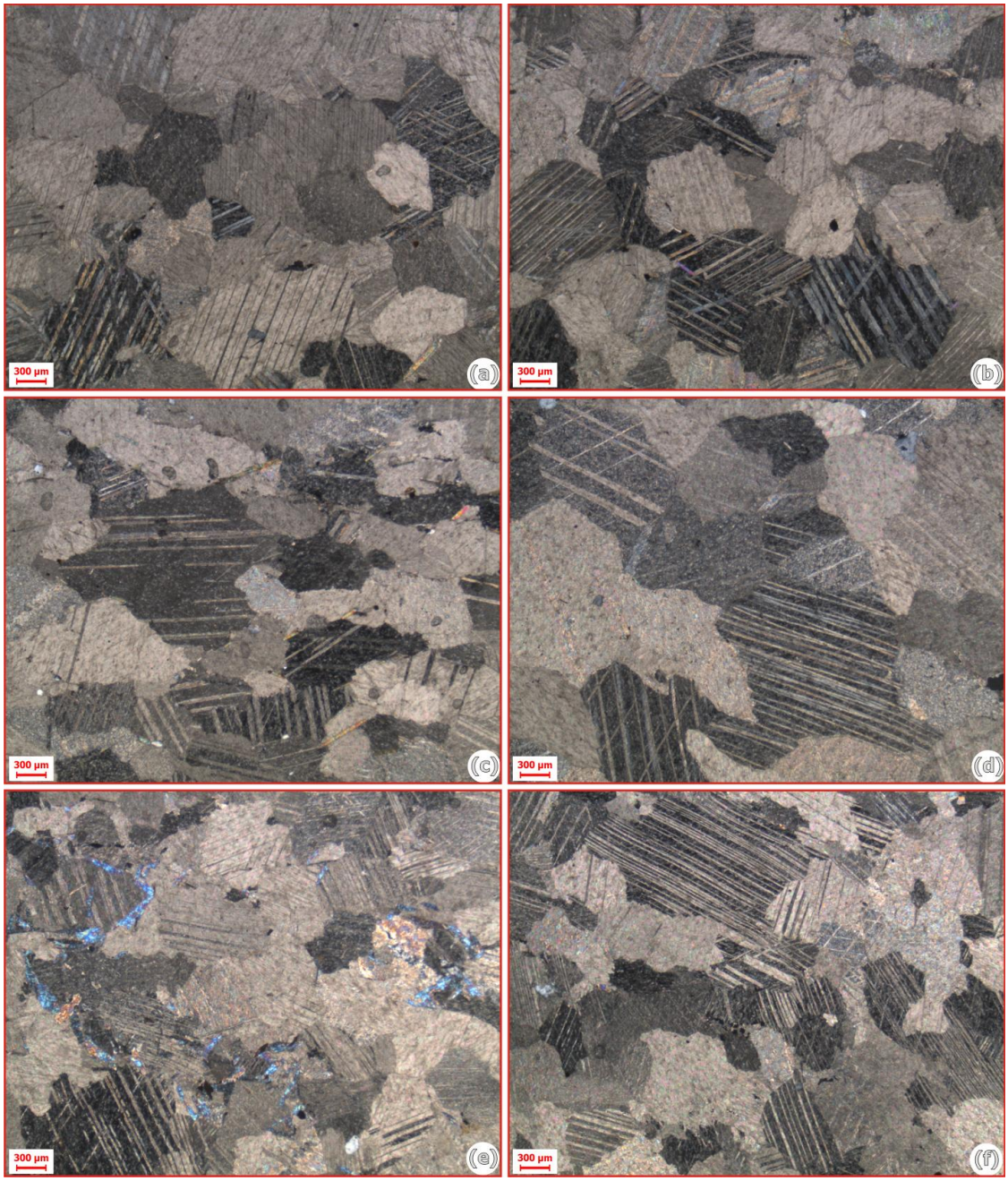
Ocaklardan alınan mermer örneklerinin mineralojik bileşimi ve petrografik özelliklerini belirlemek amacıyla ince kesit çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla makro

özelliklerine göre üç farklı gruba ayrılan mermerlerden alınan 27 adet örnek üzerinde petrografik incelemeler için ince kesitler hazırlanmıştır. İncekesit çalışmaları sonucunda Afrodisias mermer örneklerinin Laodikeia Tapınak-A yapısı, Hierapolis ve Domuzderesi antik ocaklarındaki mermer örneklerinden daha büyük kristal boyutlarına sahip olduğu belirlenmiştir.

Beyaz renkli mermer örnekleri çoğunlukla heteroblastik mozaik dokuda olup, karbonat minerallerinden ve az miktarda kuvars minerallerinden oluşmaktadır (Şekil 5.29.a). Kalsit mineralleri çoğunlukla özşekilli-yarı özşekilli kristaller halinde olup, kristal boyutları 453-4857 µm arasında değişmektedir. Karbonat minerallerinde rombohedral dilinim izleri belirgin olup, dilinim açısı 33º-58º arasındadır (Şekil 5.29.b). İri karbonat kristallerinde yaygın olarak polisentetik ikizlenmeler görülmektedir.

Beyaz renkli gri damarlı mermer örnekleri heteroblastik mozaik dokuda olup, karbonat mineralleri (kasit, dolomit), daha az oranda kuvars ve muskovit minerallerden oluşmaktadır (Şekil 5.29.c, d). Karbonat mineralleri çoğunlukla yarı özşekilli-özşekilsiz kristaller halinde olup, kristal boyutları 421-4663 µm arasında değişmektedir. İri karbonat minerallerinde rombohedral dilinim izleri belirgin olup, dilinim açısı 35º-54º arasındadır. Karbonat minerallerinde polisentetik ikizlenmeler görülmektedir.

Gri renkli mermer örnekleri çoğunlukla heteroblastik mozaik dokuda olup, egemen olarak karbonat mineralleri (kalsit, dolomit), daha az miktarda kuvars ve muskovit minerallerinden oluşmaktadır(Şekil 5.29.e). AFD-6, AFD-7, AFD-21 ve AFD-25 numaralı örneklerde karbonat mineralleri yanında piroksen minerali de gözlenmiştir. Karbonat mineralleri çoğunlukla özşekilsiz kristaller halinde görülmektedir. Kalsit kristal boyutları 397-3339 µm arasında değişmektedir. Ayrıca iri kalsit kristallerinin birçoğunda polisentetik ikizlenmeler, bazılarında kink-bant oluşumları görülmektedir (Şekil 5.29.f).



Şekil 5.29: Afrodisias mermer örneklerinin mikroskop görüntüleri. Beyaz renkli mermer örneklerinde görülen a) heteroblastik mozayik doku b) karbonat minerallerinde gözlenen rombohedral dilinim izleri ve polisentetik ikizlenmeler; Beyaz renkli gri damarlı mermerlerde görülen c) heteroblastik mozayik doku ve muskovit mineralleri d) karbonat minerallerinde gözlenen rombohedral dilinim izleri ve polisentetik ikizlenmeler; Gri renkli mermerlerde gözlenen e) heteroblastik mozayik doku, muskovit ve kuvars mineralleri f) iri karbonat minerallerinde görülen kink-bant yapıları

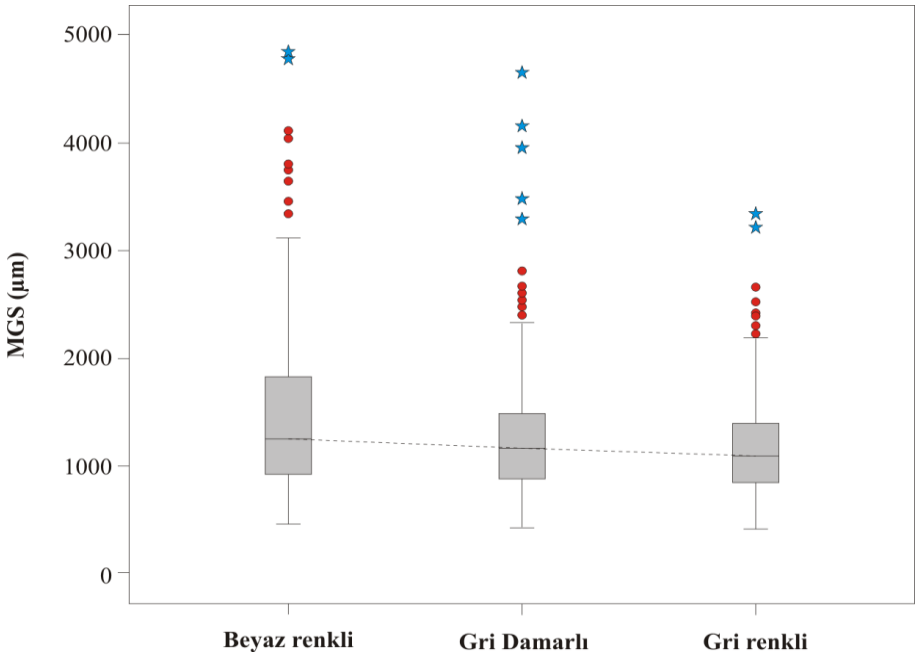
5.3.2.1 Afrodisias antik ocakları mermer örneklerinin MGS ölçümleri

Afrodisyas antik ocaklarından alınan mermer örneklerinin incekesitleri üzerinde tane boyu ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyu ölçümlerinde kristallerin uzun eksenleri boyunca ölçümlerin alınmasına dikkat edilmiştir. Ölçüm sonuçları tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9: Afrodisias mermer türlerinin MGS ölçüm sonuçları

Mermer Türü	**Tane Boyutu (µm)**			
	Minimum	**Maksimum**	**Ortanca**	**Standart sapma**
Beyaz renkli	452,780	4857,178	1246,872	776,013
Gri damarlı	420,851	4663,472	1162,786	655,532
Gri renkli	396,728	3339,821	1090,208	458,246

MGS ölçümlerine göre Afrodisias mermer örneklerinin birbirine yakın değerlere sahip olduğu ve tane boyutu bakımından homojen bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 5.30). Şekil 5.30'a göre en fazla dışlak değer gri damarlı mermer grubunda gözlenmektedir. Beyaz renkli mermer grubunun daha yüksek standart sapma değerine sahip olduğu tablo 5.9'da görülmektedir.



Şekil 5.30: Afrodisias antik ocakları mermer türleri MGS ölçümlerini gösteren kutu grafikleri

5.3.3 Afrodisias antik ocakları mermer örneklerinin XRD incelemeleri

Afrodisias örnekleri arasında farklı renk ve doku özelliği gösteren 9 adet mermer örneği üzerinde XRD çalışması yapılmıştır. Farklı renklere sahip mermer örneklerinin XRD grafiklerinde benzer desen ilişkileri gösterdikleri belirlenmiştir. Tüm kayaç toz XRD sonuçlarına göre; beyaz renkli mermer örneklerinde kalsit, beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinde baskın olarak kalsit, daha az miktarda kuvars, gri renkli mermer örneklerinde kalsit piklerine ek olarak piroksen (ojit) ve kuvars piklerinin varlığı belirlenmiştir (Şekil 5.31).

5.3.4 Afrodisias ocaklarındaki mermer örneklerinin jeokimyasal özellikleri

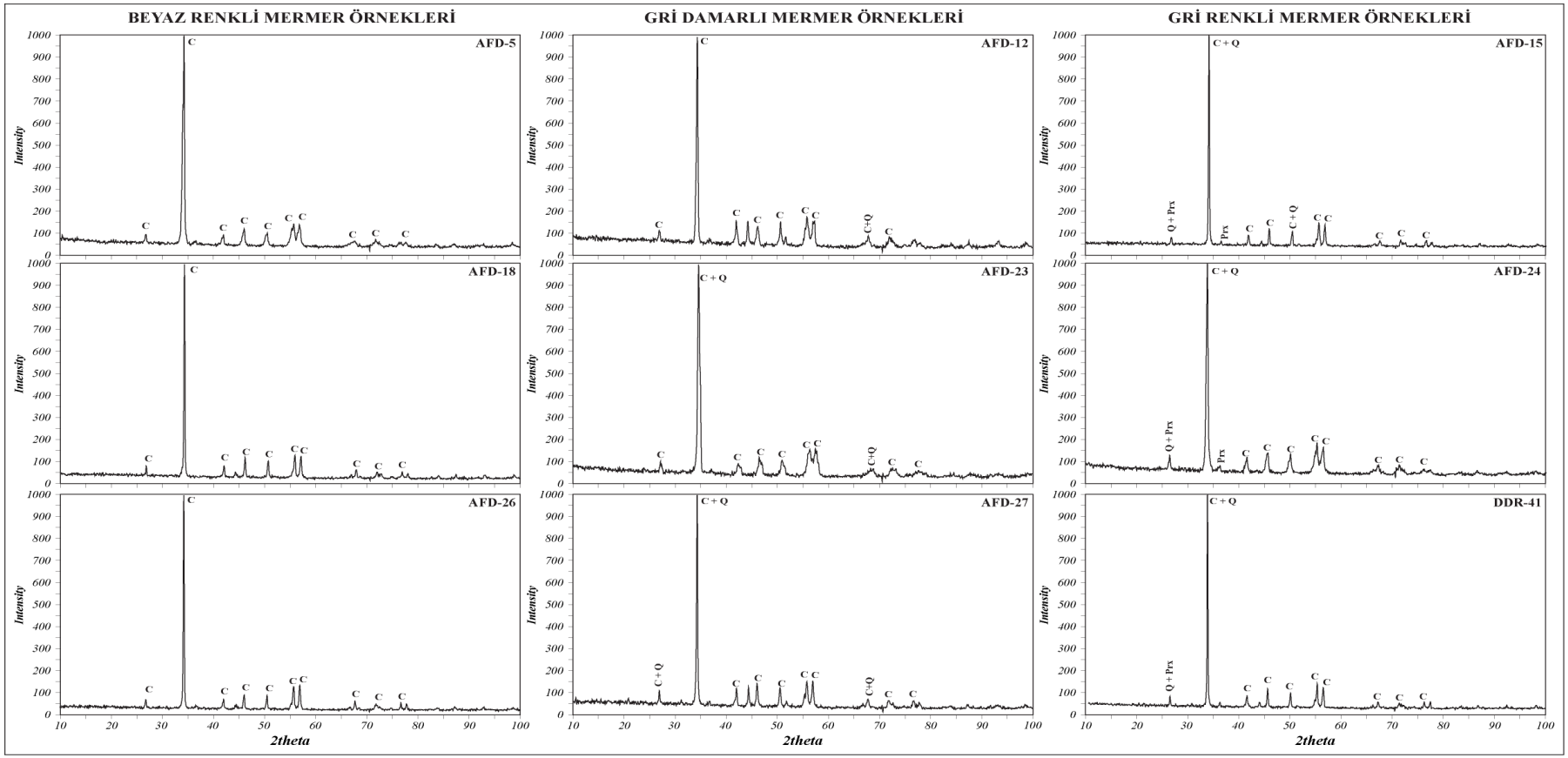
Petrografik ve XRD çalışmalarında farklılıkları belirlenen mermer örneklerinin jeokimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla ana ve iz element analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarının kutu grafikler kullanılarak yorumlaması yapılmış ve mermer örneklerinin kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Mermer örneklerine ait jeokimyasal analiz sonuçları ek D.1'de verilmiştir.

5.3.4.1 Ana ve iz element özellikleri

Afrodisias mermer örnekleri Na_2O (%) içeriği bakımından birbirine yakın dağılım aralıklarına sahip olup, gri damarlı mermer örnekleri simetrik (homojen) bir dağılım göstermektedir (Şekil 5.32).

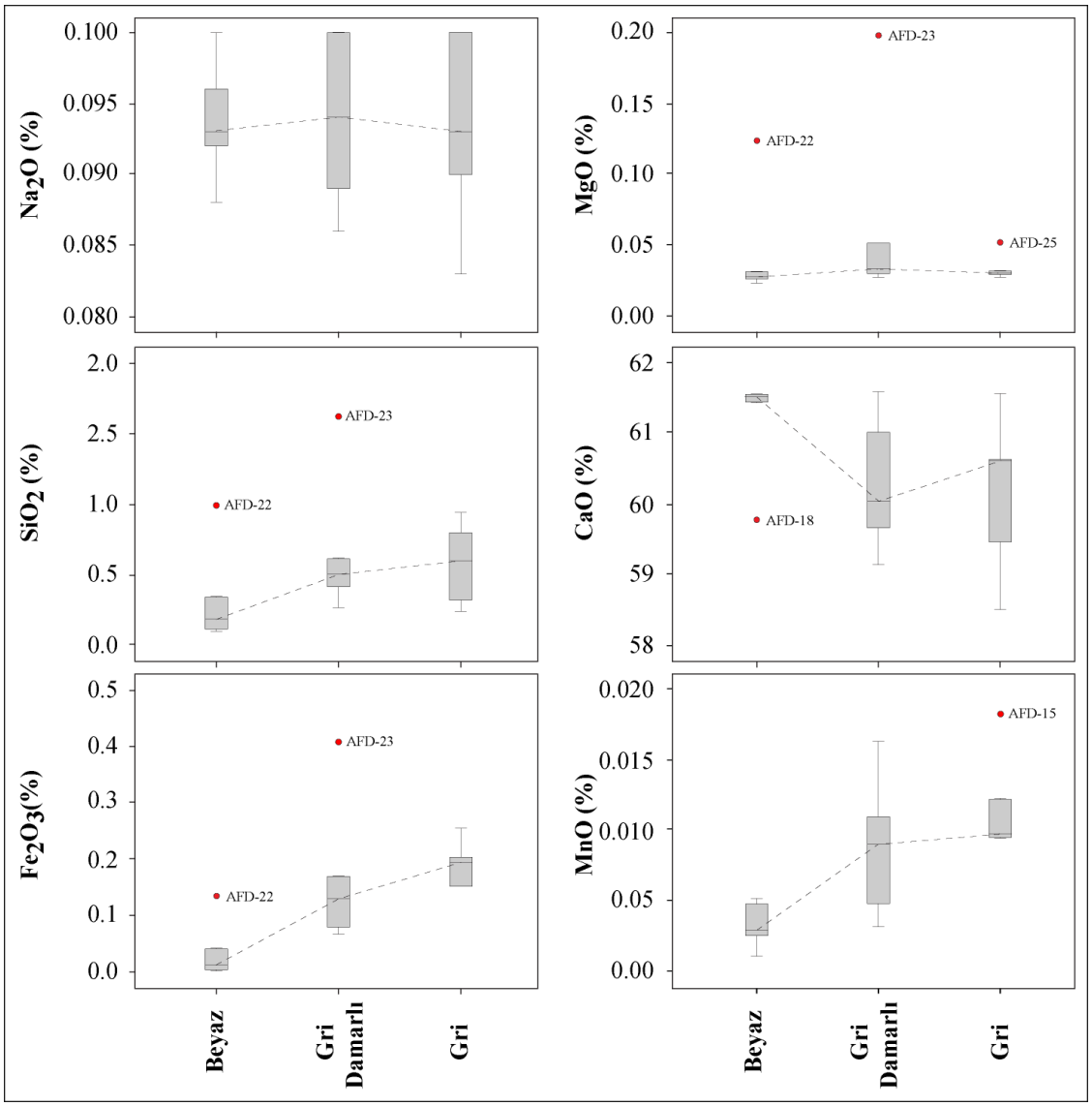
MgO (%) içerikleri bakımından mermer grupları sınırlı ve asimetrik (homojen olmayan) dağılımlar göstermektedir (Şekil 5.32). AFD-22 (beyaz renkli), AFD-23 (gri damarlı) ve AFD-25 (gri renkli) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır.

Afrodisias mermer örneklerinin SiO_2 (%) içeriklerinde beyaz renkli mermer örneklerinden gri renkli mermer örneklerine doğru artış görülmektedir. AFD-22 (beyaz renkli) ve AFD-23 (gri damarlı) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır (Şekil 5.32).



Şekil 5.31: Afrodisias antik ocakları mermer türleri XRD grafikleri

Benzer şekilde örnek gruplarının CaO (%) içeriği beyaz renkli mermerlerden gri renkli mermerlere doğru azalma eğilimindedir. Beyaz renkli mermer örnekleri oldukça sınırlı bir dağılım aralığına sahip olmakla birlikte, CaO (%) içerikleri diğer mermer grupları arasında en yüksek değerlerdedir. Beyaz renkli AFD-18 numaralı mermer örneği analiz verileri içerisinde dışlak değeri oluşturmaktadır (Şekil 5.32).



Şekil 5.32: Afrodisias antik ocakları mermer türlerinin bazı ana oksit element içeriklerini gösteren kutu grafikleri

Afrodiyas örneklerinin Fe_2O_3 (%) içeriği beyaz renkli mermer gruplarından gri renkli mermer gruplarına doğru belirgin bir artış göstermektedir (Şekil 5.32). AFD-22

(beyaz renkli) ve AFD-23 (gri damarlı) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır.

Afrodisias mermer örnekleri MnO (%) içeriği bakımından beyaz renkli mermer gruplarından gri renkli mermer gruplarına doğru artan bir dağılım deseni göstermektedir. Gri renkli AFD-15 numaralı mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır (Şekil 5.32).

Zn (ppm) değerleri bakımından beyaz renkli mermer gruplarından gri renkli mermer gruplarına doğru artan bir dağılım görülmektedir (Şekil 5.33). Beyaz renkli mermer örnekleri oldukça sınırlı bir dağılım aralığına sahip olup, gri damarlı mermer örnekleri geniş bir dağılım aralığı göstermektedir. Tüm mermer grupları genel olarak asimetrik (homojen olmayan) dağılıma sahip olup, beyaz renkli AFD-10 numaralı mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır.

Sr (ppm) içeriği bakımından gri damarlı ve gri renkli mermer gruplarında benzer dağılımlar görülürken, gri damarlı mermerler diğer mermer gruplarına göre daha geniş bir dağılım aralığına sahiptir. Gri renkli AFD-25 numaralı mermer örneğinin dışlak değer olduğu görülmektedir (Şekil 5.33).

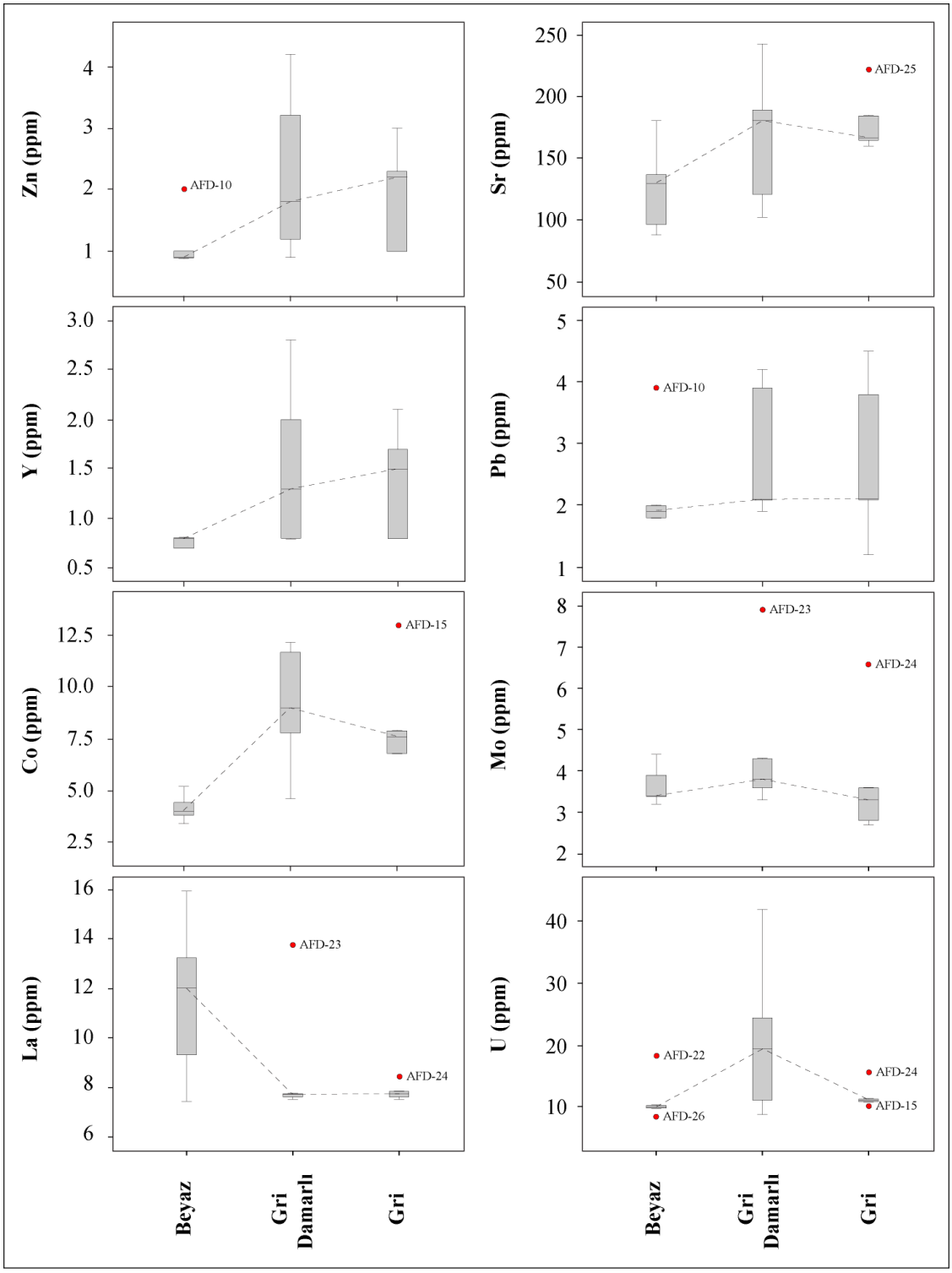
Afrodisias mermer örneklerinin Y (ppm) içeriklerinde beyaz renkli mermer örneklerinden gri renkli mermer örneklerine doğru artış görülmektedir. Bununla birlikte gri damarlı ve gri renkli mermer gruplarının benzer dağılım aralıklarına sahip oldukları belirlenmiştir (Şekil 5.33).

Gri damarlı ve gri renkli mermer gruplarının Pb (ppm) içeriği bakımından benzer dağılım aralıklarına sahip oldukları görülmektedir (Şekil 5.33). Beyaz renkli AFD-10 numaralı mermer örneği analiz verileri arasında dışlak değeri oluşturmaktadır.

Co (ppm) içerikleri bakımından mermer grupları farklı dağılımlar göstermiştir. En düşük Co (ppm) içeriğine beyaz renkli mermer grupları sahip olup, simetrik (homojen) bir dağılım görülmektedir. En geniş dağılım aralığına gri damarlı mermer örnekleri sahip olup, gri renkli AFD-15 numaralı mermer örneği dışlak değeri oluşturmaktadır (Şekil 5.33).

Afrodisias mermer örnekleri Mo (ppm) içerikleri bakımından birbirlerine yakın ve asimetrik (homojen olmayan) dağılım desenleri göstermektedir (Şekil 5.33). AFD-23

(gri damarlı) ve AFD-24 (gri renkli) mermer örnekleri analiz verileri içerisinde dışlak değerleri oluşturmaktadır.



Şekil 5.33: Afrodisias antik ocakları mermer türlerinin bazı iz element içerikleri gösteren kutu grafikleri

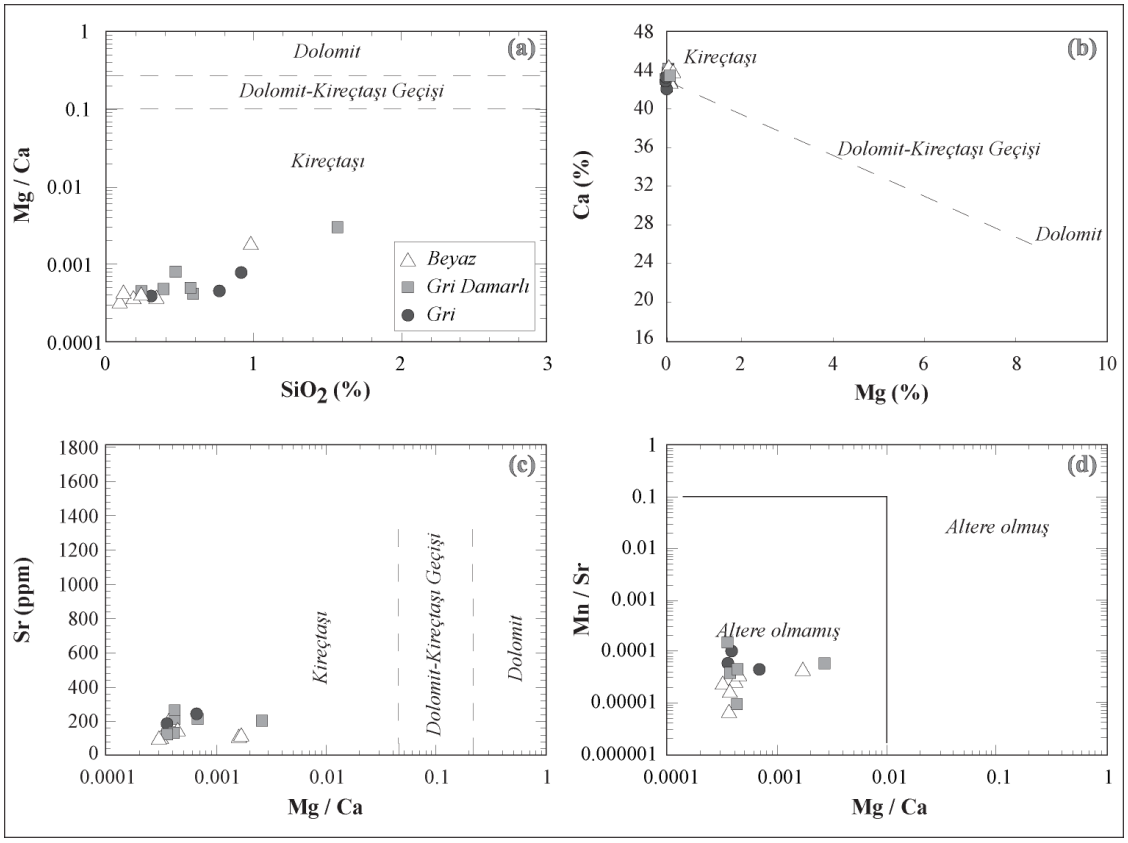
La (ppm) içerikleri bakımından gri damarlı ve gri renkli mermer örnekleri birbirine benzer ve sınırlı dağılım aralıklarına sahiptir. En geniş ve simetrik (homojen) dağılımı beyaz renkli mermer örnekleri göstermektedir. AFD-23 (gri damarlı) ve AFD-24 (gri renkli) numaralı mermer örnekleri dışlak değerleri oluşturmaktadır (Şekil 5.33).

U (ppm) içerikleri bakımından en geniş dağılım aralığına gri damarlı mermer örnekleri sahiptir. Beyaz ve gri renkli mermer örnekleri birbirine yakın ve oldukça sınırlı dağılımlar göstermektedirler (Şekil 5.33). AFD-22, AFD-26 (beyaz renkli), AFD-15, AFD-24 (gri renkli) numaralı mermer örnekleri analiz verileri arasında dışlak değerleri oluşturmaktadır.

Afrodisias antik ocakları mermer türlerinin köken kayasını belirlemek amacıyla Melezhik ve diğ. (2001) tarafından geliştirilmiş ayırım diyagramlarından yararlanılmıştır. Mg/Ca-SiO_2 diyagramına yerleştirilen mermer örneklerimizin kireçtaşı alanına düştükleri belirlenmiştir (Şekil 5.34.a). Mg/Ca oranı beyaz renkli mermerlerde 0,00032-0,00169, gri damarlı mermerlerde 0,00038-0,00277 ve gri renkli mermerlerde 0,00037-0,00073 arasında değişmektedir.

Ca-Mg diyagramında mermer örneklerinin kireçtaşı-dolomit karışım çizgisi üzerinde, kireçtaşı tarafında yoğunlaşmış oldukları görülmektedir (Şekil 5.34.b).

Sr-Mg/Ca diyagramına yerleştirilen mermer örneklerimizin çoğunlukla kireçtaşı alanında toplanmışlardır (Şekil 5.34c). Melezhik ve diğ. (2001)' e göre Mn/Sr > 0,2 ve Mg/Ca > 0,01 değerleri karbonat kayaçlarında ki çökelme sonrası meydana gelen değişimleri göstermektedir. Bu yüzden bu sınır değerlere yakın örneklerin özellikle izotop stratigrafi çalışmalarında kullanılması tavsiye edilmemektedir. Göreceli olarak düşük Sr bileşimli ve yüksek Mg/Ca ve Mn/Sr oranlarına sahip örnekler olasılıkla ilksel izotop oranları değişmiş örnekleri ifade etmektedir. Afrodisias mermer örnekleri Mn/Sr-Mg/Ca diyagramında çoğunlukla altere olmamış alanda toplanmışlardır (Şekil 5.34.d). Mn/Sr oranı beyaz renkli mermerlerde 0,000006-0,000041, gri damarlı mermerlerde 0,000008-0,000127 ve gri renkli mermerlerde 0,000041-0,000085 arasında değişmektedir.



Şekil 5.34: Afrodisias antik ocakları mermer türlerinin Melezhik ve diğ. (2001) tarafından geliştirilmiş a) Mg/Ca-SiO_2 (%) b) Ca(%)-Mg(%), c) Sr (ppm)-Mg/Ca ve d) Mn/Sr-Mg/Ca diyagramlarındaki konumları

5.3.4.2 Kimyasal analiz verilerinin ayrışım fonksiyonu analizi

Afrodisias antik ocakları mermer örneklerinin kimyasal analiz verilerine uygulanan Kruskal Wallis H testi sonuçları tablo 5.10' da verilmiştir.

Kruskal Wallis H anlamlılık testine göre analiz sonucu belirlenen 49 element' ten 11 tanesi (K_2O, TiO_2, V, MnO, Fe_2O_3, Co, As, Br, Rb, Y, Sb) istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Afrodisias antik ocakları mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizi eigen değerleri, % varyans, % kümülatif eigen değeri ve kanonik korelasyon katsayıları tablo 5.11'de gösterilmiştir.

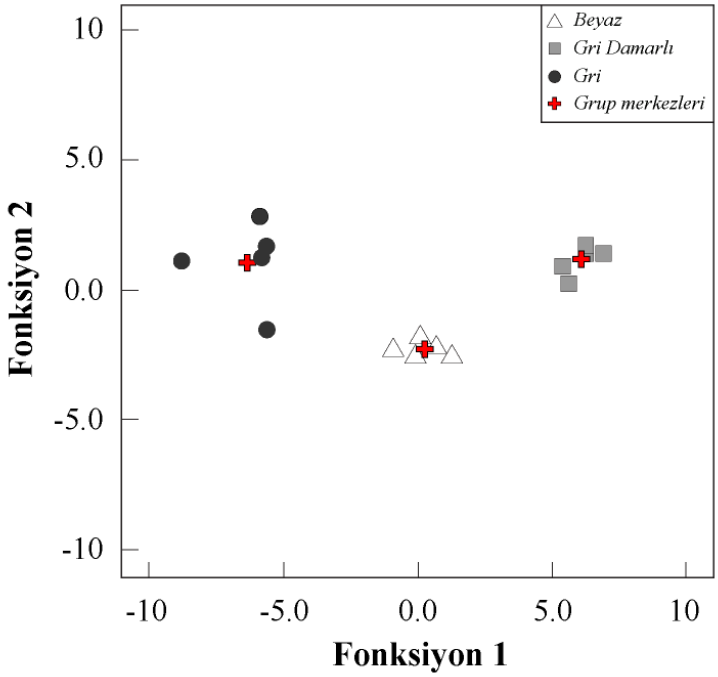
Tablo 5.10: Afrodisias mermer örneklerinin Kruskall Wallis H test sonuçları

Elementler	Ki-Kare	df	p	Elementler	Ki-Kare	df	p
Na_2O	0,016	2	0,992	**Zr**	2,429	2	0,297
MgO	1,929	2	0,381	**Nb**	2,703	2	0,259
Al_2O_3	3,86	2	0,145	**Mo**	2,011	2	0,366
SiO_2	2,58	2	0,275	**Ag**	2,727	2	0,256
P_2O_5	0,481	2	0,786	**Cd**	1,924	2	0,382
SO_3	3,524	2	0,172	**In**	0,692	2	0,707
Cl	2,58	2	0,275	**Sn**	4,807	2	0,09
K_2O	9,412	2	0,009	**Sb**	6,527	2	0,038
CaO	1,863	2	0,394	**Te**	0,657	2	0,72
TiO_2	8,675	2	0,013	**I**	5,179	2	0,075
V	6,766	2	0,034	**Cs**	3,27	2	0,195
Cr	0,984	2	0,612	**Ba**	0,046	2	0,977
MnO	7,22	2	0,027	**La**	2,204	2	0,332
Fe_2O_3	6,86	2	0,032	**Ce**	1,4	2	0,497
Co	8,18	2	0,017	**Hf**	2,034	2	0,362
Ni	0,984	2	0,612	**Ta**	1,956	2	0,376
Cu	3,402	2	0,183	**W**	0,263	2	0,877
Zn	4,19	2	0,123	**Au**	0,202	2	0,904
Ga	0,142	2	0,932	**Hg**	4,188	2	0,123
As	6,399	2	0,041	**Tl**	0,63	2	0,73
Se	2	2	0,368	**Pb**	2,293	2	0,318
Br	6,89	2	0,032	**Bi**	0,039	2	0,981
Rb	9,425	2	0,009	**Th**	0,261	2	0,877
Sr	3,92	2	0,141	**U**	3,636	2	0,162
Y	6,034	2	0,049				

Tablo 5.11: Afrodisias ocakları mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizine göre ilk 2 kanonikal ayrışım fonksiyonun eigen değerleri, %varyans ve % kümülatif eigen değerleri

Fonksiyon	Eigen Değeri	% Varyans	% Kümülatif Eigen Değeri	Kanonikal Korelasyon
1	1	32.777	90.8	90.8
2	2	3.340	9.2	100

Ayrışım fonksiyonu analiz sonucuna göre elde edilen 1 ve 2 numaralı fonksiyonlar kullanılarak hazırlanan dağılım grafiği şekil 5.35'de verilmiştir. Dağılım grafiğinde Afrodisias antik ocakları mermer türlerinin başarılı bir şekilde birbirinden ayrıldığı, kimyasal bileşim açısından beyaz renkli, beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli mermer örnekleri arasında belirgin farklılık olduğu görülmektedir (Şekil 5.35).



Şekil 5.35: Afrodisias ocaklarındaki mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak ayrışım fonksiyon analizi ile iki boyutta kümelenmesi

5.3.5 Afrodisias antik ocakları mermer örneklerinin duraylı izotop (C ve O) jeokimyası

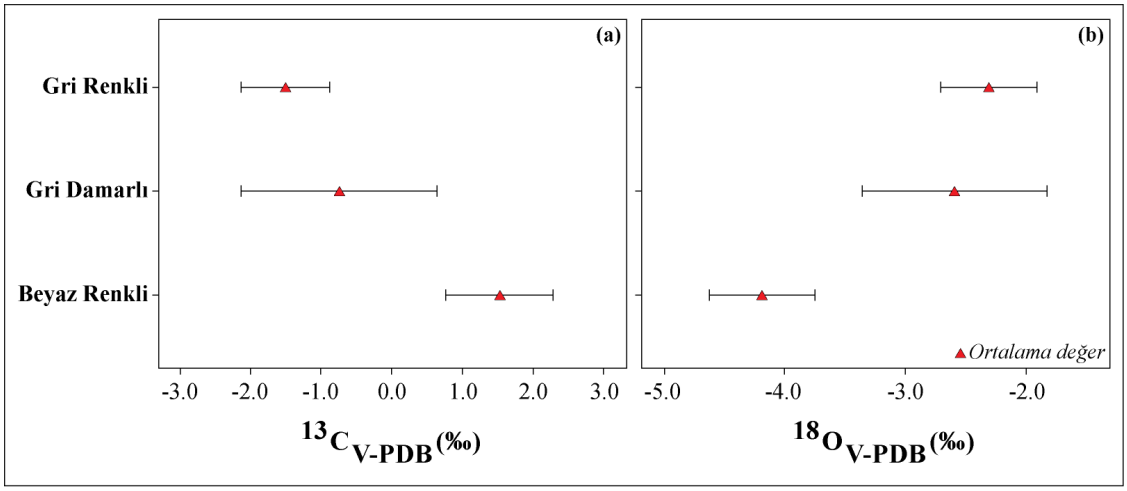
Arazi gözlemleri, mineralojik-petrografik ve jeokimyasal incelemelerin anlatıldığı bölümlerde, Afrodisias antik ocaklarındaki mermer örnekleri 3 farklı gruba ayrılmıştı. Mermer gruplarının C ve O izotop değerlerini belirlemek amacıyla; her bir mermer grubundan 5 adet olmak üzere toplam 15 adet mermer örneğinin C ve O izotop analizleri yapılmıştır. Örnek gruplarına ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçları tablo 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.12: Afrodisias mermer türlerine ait $\delta^{13}C$ ve $\delta^{18}O$ analiz sonuçları

Mermer Grubu	Örnek No	$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ (‰)	$\delta^{18}O_{V\text{-}PDB}$ (‰)
Beyaz renkli	AFD-10	1,05	-4,10
	AFD-18	2,19	-3,81
	AFD-19	0,79	-4,74
	AFD-22	1,49	-4,25
	AFD-26	2,07	-4,03
Gri damarlı	AFD-12	-1,36	-3,58
	AFD-16	0,11	-2,59
	AFD-20	-0,46	-1,91
	AFD-23	-2,38	-2,59
	AFD-27	0,28	-2,32
Gri renkli	AFD-5	-0,77	-2,65
	AFD-15	-1,28	-2,32
	AFD-21	-1,80	-1,81
	AFD-24	-2,03	-2,52
	AFD-25	-1,71	-2,24

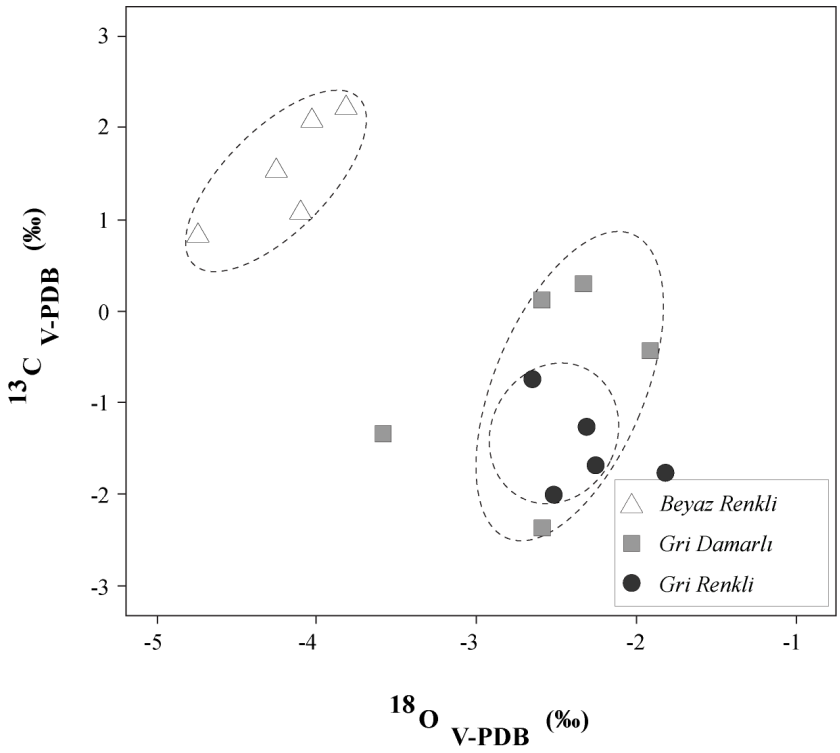
C ve O izotop değerlerinin mermer gruplarındaki dağılımları Şekil 5.36'da görülmektedir. Duraylı izotop analizleri sonucunda $\delta^{13}C$ izotop değerlerinin beyaz renkli mermer örneklerinde 0.79-2.19, gri damarlı mermer örneklerinde (-2.38)-0.28 ve gri renkli mermer örneklerinde (-2.03)-0.77 arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 5.36.a).

Benzer olarak $\delta^{18}O$ izotop değerlerinin beyaz renkli mermer örneklerinde (-4.74)-(-3.81), gri damarlı mermer örneklerinde (-3.58)-(-1.91) ve gri renkli mermer örneklerinde (-2.52)-(-1.81) arasında değiştiği görülmüştür (Şekil 5.36.b).



Şekil 5.36: Afrodisias antik ocakları mermer gruplarının a) C izotop, b) O izotop değerleri dağılım grafikleri

$\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Afrodisias mermer örneklerinden beyaz renkli mermer örneklerinin diğer iki gruba göre farklı C ve O izotop değerlerine sahip olduğu, gri damarlı ve gri renkli mermerlerin C ve O izotop değerleri bakımından birbirine yakın kümelenme gösterdikleri görülmektedir (Şekil 5.37).



Şekil 5.37: $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Afrodisias mermer türlerinin dağılımı

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Batı Anadolu'daki Laodikeia antik kenti Hıristiyanlığın en önemli ve kutsal merkezlerinden biri olup, yerleşiminde Anadolu'da yer alan 7 kiliseden birini bulundurması nedeni ile arkeolojik değere sahiptir. M.S. 1-3 ve 4-6 yüzyıllarda en parlak dönemlerini yaşayan antik kentte taş işçiliğinin en güzel örneklerinin sergilendiği birçok sosyal (tiyatro), dini (tapınak ve kilise), ticari (agora ve dükkan), yönetim yapıları ile sivil konutlar bulunmaktadır. Bu kadar fazla sayıda taş yapının bulunduğu antik kentte Tapınak-A yapısı önemli bir yere sahip olup, bu tez çalışması ile ilk defa Tapınak-A yapısında kullanılan mermerlerin mineralojik-petrografik, jeokimyasal ve izotop özellikleri incelenmiş, olası kaynak alanlarının belirlenmesi amacıyla belirlenen antik mermer ocaklarından alınan örnekler ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

1) Tapınak-A yapısında renk ve dokusal özelliklerine göre başlıca lila-mor damarlı, beyaz, beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli olmak üzere dört farklı mermer türü tanımlanmıştır. Bu mermerlerin kaynak alanlarını belirlemek amacıyla bölgedeki antik mermer ocaklarında yapılan jeolojik çalışmalar sonucunda da benzer renk ve dokusal özelliklere sahip mermer türleri tanımlanmıştır. Bu mermer türlerine ait makroskopik ve mikroskopik özellikler tablo 6.1, 6.2, 6.3' de özet bilgi olarak verilmiştir.

2) Beyaz renkli lila-mor damarlı mermer örneklerinin heteroblastik mozaik dokuda oldukları ve kalsit, dolomit, eser miktarda piroksen (diyopsit) minerallerinden oluştukları belirlenmiştir. Ayrıca örnekleri oluşturan bileşenlerin boyutları 58-2035 µm arasında değişmektedir. Ancak lila-mor damarlı mermer örneklerine incelenen antik mermer ocaklarında rastlanılmamıştır. Bununla birlikte Domuzderesi antik ocakları yakınında lila-mor damarlı mermer bloğuna rastlanılmış ancak devamı arazide gözlemlenmemiştir. Buradan hareketle lila-mor damarlı mermerlerin çok

sınırlı bir seviye halinde olduğu ve zamanla işletilip tüketildiği ve/veya Muğla bölgesindeki antik ocaklardan ticaret yolu ile getirilmiş olabileceği yorumu yapılmıştır.

3) Beyaz renkli mermer örnekleri bileşen boyutu bakımından beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli mermerlere göre nispeten daha iri kristalli yapıdadır. Tapınak-A, Hierapolis ve Domuzderesi antik ocaklarındaki beyaz renkli mermer örneklerinde şekerlenme olarak tanımlayabileceğimiz yapısal bozunmalar karateristiktir.

4) Dokusal olarak homoblastik poligonal (Tapınak-A ve Hierapolis), heteroblastik poligonal (Domuzderesi) ve homoblastik mozaik (Afrodisias) dokuya sahip olan beyaz renkli mermer örnekleri ana mineral olarak başlıca kalsit daha az oranda dolomit' ten oluşmaktadır. Domuzderesi ve Afrodisias antik ocakları beyaz renkli mermer örneklerinde tali mineral olarak kuvars, piroksen ve muskovit mineralleri belirlenmiştir. Tapınak-A ve Hierapolis beyaz renkli mermer örneklerinde herhangi bir tali mineral türüne rastlanılmamıştır.

5) Tapınak-A yapısı ve incelenen antik mermer ocaklarında gözlenen beyaz renkli gri damarlı ve gri renkli mermer örnekleri heteroblastik mozaik dokuya sahiptir.

6) 0.03-0.1 cm arasında değişen damar yapıları karakteristik olan beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinde ana mineral olarak kalsit ve daha az oranda dolomit, tali mineral olarak kuvars, piroksen ve muskovit mineralleri belirlenmiştir.

7) Diğer mermer türlerinden farklı olarak gri renkli mermer örneklerinde beyaz renkli düzensiz oldukça ince (kılcal) damar yapıları ve tipik olarak mineral yönlenmesi (Afrodisias örnekleri hariç) görülmektedir. Gri renkli mermerlerde ana mineral olarak kalsit ve daha az oranda dolomit, tali mineral olarak kuvars, piroksen, muskovit ve zirkon mineralleri belirlenmiştir. Ayrıca kuvars ve piroksen türü tali mineraller yuvarlaklaşmış taneler şeklinde görülmektedir.

8) Tüm mermer örnekleri üzerinde gerçekleştirilen XRD ve CRS çalışmalarında (yanlızca Tapınak-A yapısı örnekleri üzerinde) mikroskopta belirlenen benzer mineral bileşimleri tespit edilmiştir. Özellikle mineral türlerinin ayrımında XRD ve CRS çalışmalarının tek başına yeterli olmadıkları ve istenilen düzeyde bir ayrıma gidilemediği görülmüştür.

Tablo 6.1: Tapınak-A yapısı ve antik mermer ocaklarındaki beyaz renkli mermer örneklerinin makro ve mikro özellikleri

Örnek Yerleri	**MAKRO ÖZELLİKLER**		**MİKROSKOPİK ÖZELLİKLER**				**XRD' de Belirlenen Mineral Bileşimi**	**Diğer Özellikler**
	Renk	**Kristal Boyutu**	**Ana Mineral Bileşimi**	**Tali Mineraller**	**Doku**	**MGS (µm)**		
Laodikeia Tapınak-A	Beyaz	Orta-iri (2 - >5 mm)	Kalsit ± Dolomit	-	Homoblastik Poligonal	112-4090	Kalsit	Bazı örneklerde şekerlenme olarak tanımlayabileceğimiz yapısal bozunmalar görülüyor. Kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme ve kink-bant oluşumları görülüyor
Hierapolis	Beyaz	Orta-iri (2 - >5 mm)	Kalsit ± Dolomit	-	Heteroblastik Poligonal	317-3804	Kalsit ± Dolomit	Bazı örneklerde şekerlenme olarak tanımlayabileceğimiz yapısal bozunmalar görülüyor. Kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme yaygın
Domuzderesi	Beyaz	Orta-iri (2 - >5 mm)	Kalsit ± Dolomit	± Kuvars ± Piroksen ± Muskovit	Homoblastik Poligonal	286-1830	Kalsit	Bazı örneklerde şekerlenme olarak tanımlayabileceğimiz yapısal bozunmalar görülüyor. Kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme yaygın
Afrodisias	Beyaz	Orta-iri (2 - >5 mm)	Kalsit ± Dolomit	± Kuvars	Heteroblastik Mozaik	453-4857	Kalsit	Örneklerin taze kırık yüzeylerinde çürük yumurta kokusu hissediliyor. Kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme yaygın

Tablo 6.2: Tapınak-A yapısı ve antik mermer ocaklarındaki beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin makro ve mikro özellikleri

Örnek Yerleri	MAKRO ÖZELLİKLER		MİKROSKOPİK ÖZELLİKLER				XRD' de Belirlenen Mineral Bileşimi	Diğer Özellikler
	Renk	Kristal Boyutu	Ana Mineral Bileşimi	Tali Mineraller	Doku	MGS (µm)		
Laodikeia Tapınak-A	Beyaz renkli gri damarlı	İnce-orta (0.1-2mm)	Kalsit > Dolomit	± Kuvars ± Muskovit ± O. Mineral	Heteroblastik Mozaik	60-3365	Kalsit Dolomit Kuvars	0.05-0.1 cm genişliğinde gri renkli birbirine paralel damar yapıları karakteristiktir. Kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme ve kink-bant oluşumları görülüyor.
Hierapolis	Beyaz renkli gri damarlı	İnce-orta (0.1-2mm)	Kalsit > Dolomit	± Kuvars ± Piroksen ± Muskovit	Heteroblastik Mozaik	268-711	Kalsit Dolomit Kuvars	0.05-0.2 cm genişliğinde gri renkli düzensiz damar yapıları karakteristiktir. Kayacı oluşturan bileşenlerde yönlenme, kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme görülüyor.
Domuzderesi	Beyaz renkli gri damarlı	İnce-orta (0.1-2mm)	Kalsit > Dolomit	± Kuvars ± Piroksen ± Muskovit	Heteroblastik Mozaik + Heteroblastik Poligonal	269-4154	Kalsit Dolomit Kuvars	0.03-0.1 cm genişliğinde gri renkli zigzag şekilli damar yapıları karakteristiktir. Kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme görülüyor.
Afrodisias	Beyaz renkli gri damarlı	İnce-orta (0.1-2mm)	Kalsit > Dolomit	± Kuvars ± Muskovit	Heteroblastik Mozaik	421-4663	Kalsit Kuvars	0.08-0.2 cm genişliğinde gri renkli birbirine paralel damar yapıları karakteristiktir. Kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme görülüyor.

Tablo 6.3: Tapınak-A yapısı ve antik mermer ocaklarındaki gri renkli mermer örneklerinin makro ve mikro özellikleri

Örnek Yerleri	MAKRO ÖZELLİKLER		MİKROSKOPİK ÖZELLİKLER				XRD' de Belirlenen Mineral Bileşimi	Diğer Özellikler
	Renk	Kristal Boyutu	Ana Mineral Bileşimi	Tali Mineraller	Doku	MGS (µm)		
Laodikeia Tapınak-A	Gri-koyu gri	İnce-orta (0.1-2mm)	Kalsit > Dolomit	± Kuvars ± Piroksen ± Zirkon	Heteroblastik Mozaik	68-3448	Kalsit Dolomit Kuvars	Kayacı oluşturan bileşenlerde yönlenme, kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme ve kink-bant yapıları görülüyor. Bazı kesitlerde yuvarlaklaşmış kuvars taneleri var.
Hierapolis	Koyu gri-siyahımsı gri	İnce-orta (0.1-2mm)	Kalsit ± Dolomit	± Kuvars ± Piroksen	Heteroblastik Mozaik	204-1318	Kalsit Kuvars Piroksen	Beyaz renkli düzensiz oldukça ince damar yapıları görülüyor. Kayacı oluşturan bileşenlerde yönlenme, kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme tipiktir. Bazı kesitlerde yuvarlaklaşmış kuvars ve piroksen taneleri var.
Domuzderesi	Koyu gri-siyahımsı gri	İnce-orta (0.1-2mm)	Kalsit > Dolomit	± Kuvars ± Piroksen	Heteroblastik Mozaik + Heteroblastik Poligonal	305-1961	Kalsit Kuvars Piroksen	Beyaz renkli düzensiz oldukça ince damar yapıları görülüyor. Kayacı oluşturan bileşenlerde yönlenme, kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme tipiktir.
Afrodisias	Gri-mavimsi gri	İnce-orta (0.1-2mm)	Kalsit > Dolomit	± Kuvars ± Piroksen ± Muskovit	Heteroblastik Mozaik	397-3339	Kalsit Kuvars Piroksen	Beyaz renkli düzensiz oldukça ince damar yapıları görülüyor. Kalsit kristallerinde polisentetik ikizlenme ve kink-bant yapıları görülüyor.

9) Bulguların özetlendiği tablo 6.1, 6.2, 6.3'e göre Tapınak-A yapısında kullanılan mermer türlerinin Hierapolis ve Domuzderesi antik mermer ocaklarındaki mermer türleri ile büyük oranda benzerlik gösterdiği söylenebilir. Bununla birlikte Afrodisias antik ocakları mermer türlerinin tali mineral içeriği, MGS ve bazı fiziksel özellikler bakımından diğer antik ocaklardan ayrıldığı görülmektedir.

10) Tapınak-A yapısı ve antik ocaklarındaki mermer türlerinin köken kayasını belirlemek amacıyla Melezhik ve diğ. (2001) tarafından Ca, Mg, Si, Sr elementleri kullanılarak hazırlanan ayrım diyagramları kullanılmıştır. Bu diyagramlara yerleştirilen mermer örneklerinin çoğunlukla ilksel izotop oranları değişmemiş, kireçtaşı alanına düştükleri belirlenmiştir. Bu diyagramlar için kullanılan bazı ana oksit element değerleri, bazı element oranları ile örneklerin C-O duraylı izotop değer aralıkları tablo 6.4'de verilmiştir.

11) Monomineralli (baskın olarak kalsit) bir kayaç olan mermerleri sadece element içeriklerine göre değerlendirdiğimizde sağlıklı bir ayrım yapılamadığı, mermer örneklerinin birbirine yakın element içeriklerine sahip oldukları görülmüştür (Tablo 6.4). Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardan herhangi bir sistematiğe dayandırılmadan alınan mermer örneklerimiz istatistik bilimi açısından non-parametrik ve homojen olmayan veriler olarak tanımlanmaktadır. Jeokimyasal analiz sonuçlarımızı anlamlı ve ayırtman kılabilmek için bu varsayımdan hareketle SPSS istatistik programında non-parametrik testlerden çoklu bağımsız değişken grupları için Kruskall Wallis H testi uygulanmıştır. SPSS programı ile yapılan değerlendirmeler sonucunda renk farklılığı ve mineralojik-petrografik incelemelere göre belirlenen ayrımın kimyasal bileşime göre de yapılabilir olduğu belirlenmiştir.

12) Jeokimyasal özellikleri dikkate aldığımız zaman Tapınak-A yapısında kullanılan mermer örneklerinin hangi antik ocak örnekleri ile benzeştiğini belirlemek için ayrışım fonksiyon analizi yapılmış, analiz sonucu elde edilen eigen değerleri, % varyans, % kümülatif eigen değeri ve kanonik korelasyon katsayıları tablo 6.5' de gösterilmiştir.

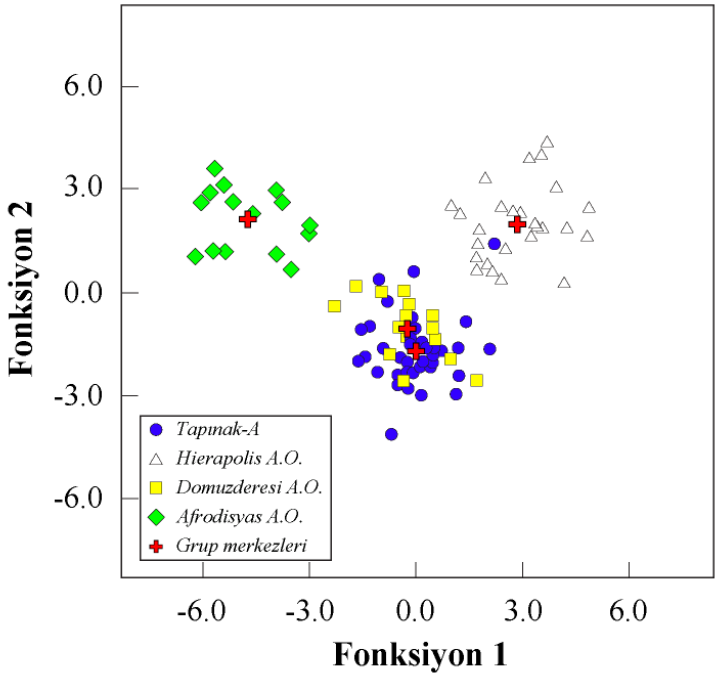
Tablo 6.4: Tapınak-A yapısı ve antik mermer ocaklarındaki mermer örneklerinin bazı element içerikleri ve duraylı izotop içeriklerini karşılaştırma tablosu

	LAODİKEİA TAPINAK-A	**HİERAPOLİS**	**DOMUZDERESİ**	**AFRODİSYAS**
Beyaz Renkli Mermerler				
CaO (%)	57.37-62.39	54.84-61.64	56.58-62.54	59.76-61.55
MgO (%)	0.026-1.551	0.029-1.840	0.024-0.246	0.020-0.120
Fe_2O_3 (%)	0.0009-0.1389	0.1362-0.7572	0.0634-0.1130	0.0035-0.1345
MnO (%)	0.0011-0.0128	0.00818-0.06470	0.00432-0.00987	0.00105-0.00512
Mg/Ca	0.00037-0.02280	0.00039-0.02619	0.00032-0.00169	0.00032-0.00169
Mn/Sr	0.000005-0.00007	0.000030-0.00022	0.000006-0.00004	0.000006-0.00004
Rb/Sr	0.00191-0.00726	0.00244-0.00835	0.00366-0.00933	0.00366-0.00933
$\delta^{13}C$	(-0.38)-2.36	1.78-3.52	0.32-2.54	0.79-2.19
$\delta^{18}O$	(-8.10)-(-2.20)	(-9.35)-(-7.32)	(-8.70)-(-7.10)	(-4.74)-(-3.81)
Gri Damarlı Mermerler				
CaO (%)	54.35-62.74	56.03-61.63	56.83-62.98	59.14-61.58
MgO (%)	0.023-2.020	0.029-0.518	0.027-1.071	0.027-0.197
Fe_2O_3 (%)	0.0403-0.1384	0.1235-0.6199	0.0463-0.7293	0.0678-0.4079
MnO (%)	0.00329-0.02930	0.00791-0.03370	0.00387-0.03290	0.00317-0.01630
Mg/Ca	0.00031-0.03078	0.00042-0.00731	0.00036-0.01522	0.00036-0.01522
Mn/Sr	0.000002-0.00033	0.000010-0.00009	0.000002-0.00009	0.000008-0.00013
Rb/Sr	0.00052-0.02165	0.00236-0.01624	0.00084-0.00701	0.00741-0.05414
$\delta^{13}C$	(-1.47)-(2.46)	0.63-3.08	(-1.44)-2.03	(-2.38)-0.28
$\delta^{18}O$	(-9.16)-(-5.26)	(-9.55)-(-5.76)	(-9.42)-(-7.00)	(-3.58)-(-1.91)
Gri Renkli Mermerler				
CaO (%)	60.18-63.23	55.85-67.07	53.13-60.08	58.50-60.63
MgO (%)	0.022-0.041	0.0320-0.9000	0.028-0.479	0.027-0.051
Fe_2O_3 (%)	0.0074-0.0402	0.1466-0.5883	0.3013-0.8480	0.1520-0.2538
MnO (%)	0.00145-0.00567	0.01261-0.03450	0.01880-0.04060	0.00978-0.01817
Mg/Ca	0.00029-0.00058	0.00043-0.01359	0.00043-0.00761	0.00037-0.00073
Mn/Sr	0.000003-0.00001	0.000022-0.00010	0.000019-0.00005	0.000041-0.00009
Rb/Sr	0.00101-0.00452	0.00334-0.02144	0.00215-0.03001	0.00876-0.02604
$\delta^{13}C$	1.90-2.21	0.90-3.12	1.64-3.41	(-2.03)-0.77
$\delta^{18}O$	(-0.65)-0.04	(-7.24)-(-1.21)	(-13.26)-(-5.30)	(-2.52)-(-1.81)

Tablo 6.5: Tapınak-A ve antik mermer ocaklarındaki tüm mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçları ile yapılan ayrışım fonksiyon analizine göre ilk 3 kanonikal ayrışım fonksiyonun eigen değerleri, %varyans ve % kümülatif eigen değerleri

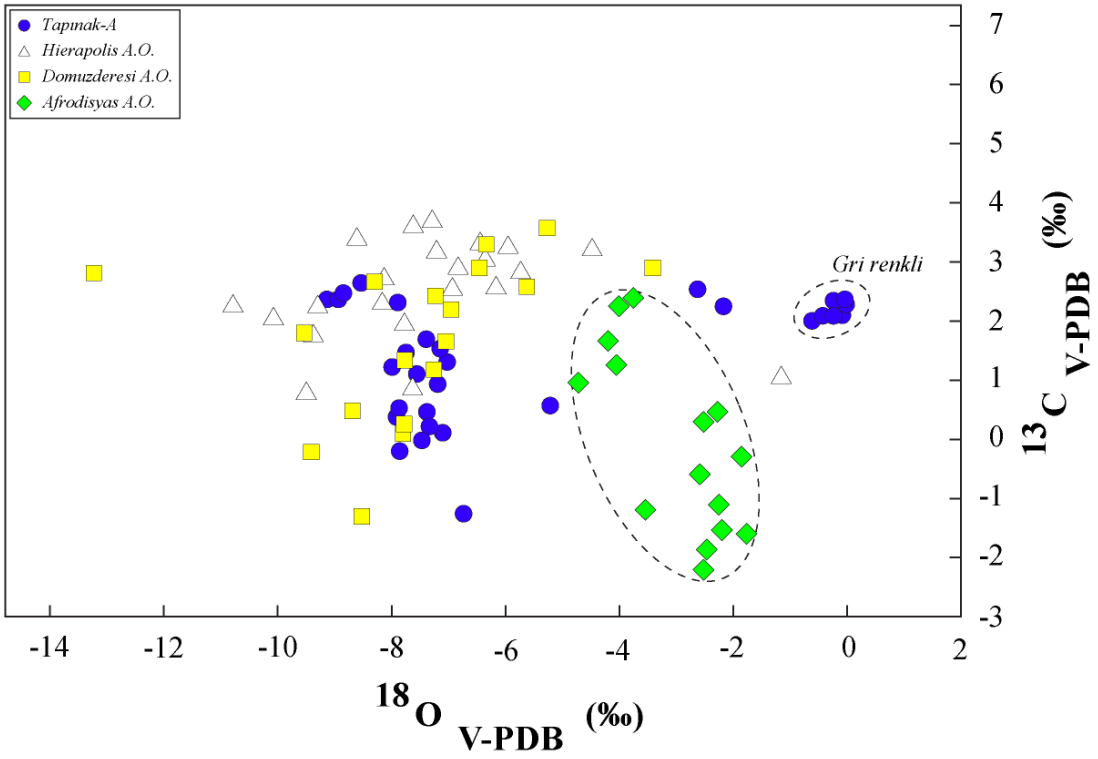
Fonksiyon	Eigen Değeri	% Varyans	% Kümülatif Eigen Değeri	Kanonikal Korelasyon
1	5.986	52.0	52.0	0.926
2	3.266	28.4	80.4	0.875
3	2.257	19.6	100.0	0.832

Ayrışım fonksiyon analizinde Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardan alınan örneklerin renk farklılığı dikkate alınmamış, bunun yerine örneklerin farklı bölgelerden alınmış olduğu ve kayaç analizlerinde tüm elementlerin anlamlı olduğu varsayımı kabul edilmiştir. Şekil 6.1 Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardan toplanan mermer örneklerinin iki boyutlu olarak kümelenmesini göstermektedir. Bu dağılım diyagramında Tapınak-A yapısında kullanılan mermer örneklerinin Domuzderesi antik ocakları mermer örnekleri ile büyük oranda benzeştiği belirlenmiştir.



Şekil 6.1: Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardaki mermer türlerinin kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak ayrışım fonksiyon analizi ile iki boyutta kümelenmesi

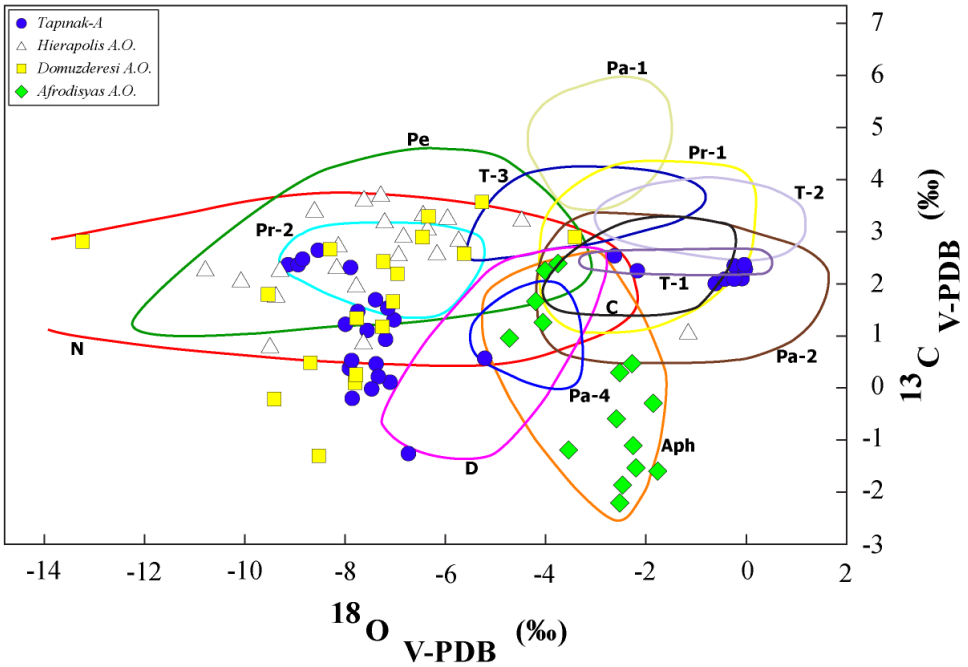
13) C ve O duraylı izotop bileşimlerinin renk farklılığı gözetmeksizin Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardaki mermer örneklerindeki dağılımını görmek amacıyla $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramı hazırlanmıştır. Diyagramda Tapınak-A yapısı mermerleri ile Hierapolis ve Domuzderesi antik ocaklarındaki mermer örneklerinin biribirine yakın C ve O izotop bileşimlerine sahip oldukları, Afrodisias antik ocakları mermer örneklerinin farklı bir alanda kümelendikleri belirlenmiştir (Şekil 6.2). Aynı diyagramda Tapınak-A yapısına ait gri renkli mermer örneklerinin oldukça farklı bir alanda kümelendikleri görülmektedir.



Şekil 6.2: $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardaki mermer türlerinin konumu

14) Antik dönem sanat eserlerinin ve yapı taşlarının kaynak alanını belirleme çalışmalarında C, O duraylı izotop bileşimleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Laodikeia Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardan toplanan mermer örnekleri kaynak alanlarının belirlenmesi amacıyla Gorgoni ve diğ. (1998)' da verilen ve tüm Akdeniz havzası antik dönem mermerleri için geliştirilmiş diyagrama yerleştirilmiştir. C ve O duraylı izotop değerleri kullanılarak hazırlanan diyagramda renk ayrımı yapılmaksızın yerleştirilen mermer örneklerinin (Tapınak-A gri renkli mermerler

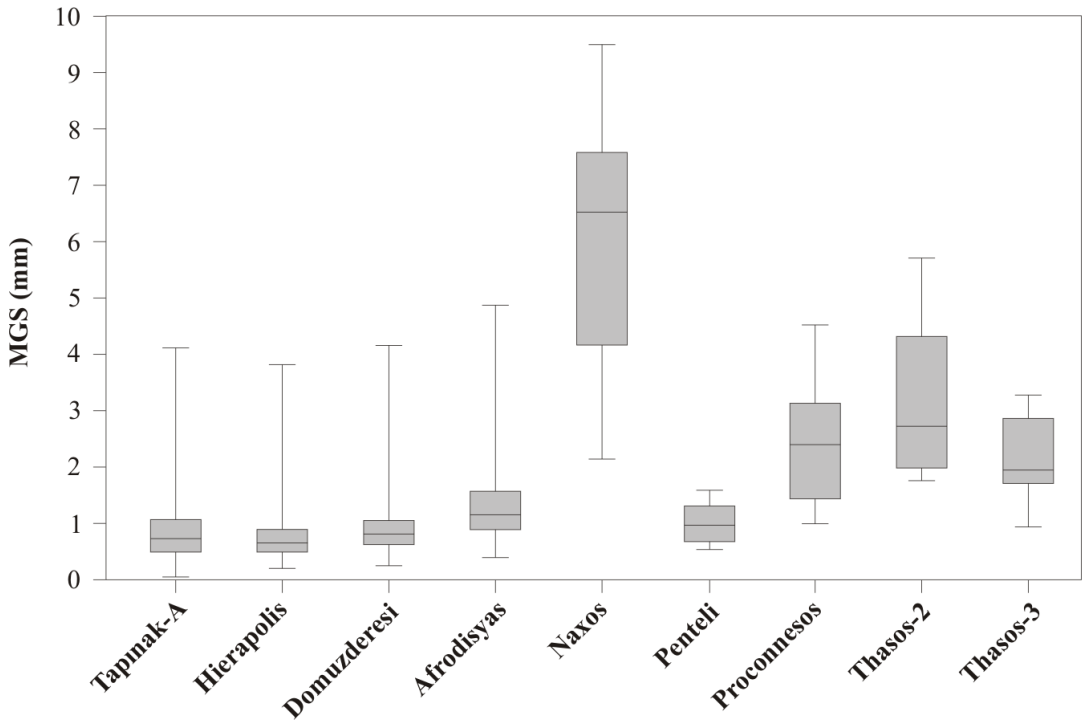
hariç) Naxos, Penteli (Yunanistan) ve Proconnesos-2 (Marmara Adası) ocak bölgelerine düştükleri görülmüştür (Şekil 6.3). Tapınak-A yapısı gri renkli mermerlerinin aynı diyagramda Thasos-1 (Yunanistan) ve Proconnesos-1 (Marmara Adası) ocak bölglerine düştükleri belirlenmiştir. Bununla birlikte aynı diyagramda Afrodisias antik ocaklarından alınan mermer örneklerimizin C ve O duraylı izotop değerleri bakımından Tapınak-A, Hierapolis ve Domuzderesi mermer örneklerinden farklılık gösterdiği ve farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarla büyük oranda benzerlik sunduğu belirlenmiştir. Bu durum yapmış olduğumuz duraylı izotop çalışmalarını doğrular niteliktedir.



Şekil 6.3: $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardaki mermer türleri ile Akdeniz havzasındaki antik mermer ocak ve eserlerinin konumu [(Aph: Afrodisias (Karacasu-Türkiye), C: Carrara (İtalya), D: Docimium (İscehisar-Türkiye), N: Naxos (Yunanistan Adası), Pa-1, 2, 4: Paros (Yunanistan Adası), Pe: Penteli (Yunanistan), Pr-1, 2: Proconnesos (Marmara Adası-Türkiye), T-1, 2, 3: Thasos (Yunanistan Adası)]

15) Doğru bir kaynak alanının belirtilebilmesi için belirlenen kaynak alanlarındaki mermerler ile Tapınak-A yapısı ve antik ocaklardaki mermerlerin petrografik özelliklerini karşılaştırmak daha sağlıklı sonuçların elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Bu amaçla Proconnesos, Naxos, Penteli ve Thasos antik ocaklarındaki

mermer örneklerinin mineralojik-petrografik özellikleri tablo 6.6' da verilmiştir. Tez konusunu oluşturan mermer örnekleri ile Proconnesos, Naxos, Penteli ve Thasos mermer örneklerinin renk, dokusal özellikler ve ana mineral bileşimi açısından biribirine benzedikleri söylenebilir. Ancak tali mineral, MGS ve bazı karakteristik özellikler bakımından farklılıklar görülmektedir. Örneğin renk farklılığına bakılmaksızın mermerlerin maksimum tane boyutları karşılaştırıldığında Tapınak-A, Hierapolis, Domuzderesi ve Afrodisias örneklerinin Naxos, Proconnesos, Thasos-2, 3 mermerlerinden belirgin bir şekilde ayrıldığı, Penteli mermerleri ile benzer boyutlara sahip oldukları görülmektedir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4: Tapınak-A, Hierapolis, Domuzderesi, Afrodisias mermer örnekleri ile Akdeniz havzasındaki bazı antik mermer ocaklarındaki örneklerin maksimum tane boyutlarının karşılaştırması

Tablo 6.6: Akdeniz havzasındaki bazı antik mermer ocaklarındaki mermer örneklerinin makro ve mikro özellikleri

Örnek Yerleri	MAKRO ÖZELLİKLER		MİKROSKOPİK ÖZELLİKLER				DİĞER ÖZELLİKLER
	Renk	Kristal Boyutu (mm)	Ana Mineral Bileşimi	Tali Mineraller	Doku	MGS (µm)	
Proconnesos[1]	Baskın olarak beyaz renkli (heykel yapımında), birbirine paralel gri renkli damarlı	Orta-iri (2 - >5)	Kalsit, dolomit	Apatit Klorit Flogopit Margarit	Heterobstik Mozaik	400-3500	Kristal sınırları oldukça girintili çıkıntılı yapıdadır. Deformasyona uğramış polisentetik ikizlenmeler yaygın olarak görülür. Proconnesos mermerlerinin taze kırık yüzeylerinde kuvvetli çürük yumurta kokusu hissediliyor
([1]Gorgoni ve diğ.. 1998; Attanasio 2003; Attanasio ve diğ.. 2008)							
Naxos[2]	Baskın olarak gri renkli, bununla birlikte beyaz renkli mermerlerde görülmektedir.	İri (>5)	Kalsit, Dolomit	Apatit Titanit Muskovit Tremolit Diyopsit	Heteroblastik Mozaik	2000-10000	Oldukça iri kristalli bir yapıda oup, kristaller çoğunlukla deformasyon yapıları göstermektedir. Mermerleri oluşturan kristallerde yönlenme tipiktir. Naxos mermerlerinin taze kırık yüzeylerinde çürük yumurta kokusu hissediliyor.
([2]Gorgoni ve diğ.. 1998; Attanasio 2003; Capedri ve Venturelli 2004; Capedri ve diğ.. 2004; Ebert ve diğ.. 2010)							
Penteli[3]	Beyaz renkli oldukça parlak ve homojen bir renk dağılımına sahip	İnce-orta (0.1-2)	Kalsit	Kuvars Apatit Fenjit Muskovit Serizit	Homoblastik/Heteroblastik Poligonal	500-1100	İnce taneli yapıda olup, oldukça serttir. Bu özelliği ile iyi parlatılabildiği için mimari yapılarda kullanılmıştır. Kalsit kristallerinde yönlenme tipiktir.
([3]Gorgoni ve diğ.. 1998; Attanasio 2003; Capedri and Venturelli 2004)							
Thasos[4]	Beyaz renkli (Dolomit) ve Gri renkli (Kalsit)	Orta (Beyaz) Orta-İri (Gri) (0.1-2)	Kalsit	Apatit Muskovit Klorit Fenjit Flogopit	Homoblastik/Heteroblastik Mozaik	500-1100	İnce taneli yapıda olup, oldukça serttir. Bu özelliği ile iyi parlatılabildiği için mimari yapılarda kullanılmıştır. Kalsit kristallerinde yönlenme tipiktir.
([3]Gorgoni ve diğ.. 1998; Attanasio 2003; Capedri ve Venturelli 2004)							

Ancak Penteli mermerleri ince taneli olup, oldukça sert bir yapıya sahiptir. Bu özelliği ile iyi parlatılabildiği için çoğunlukla heykel, büst ve iç mimari yapılarında yaygın olarak kullanılmıştır. Ayrıca kuvars, apatit, fenjit, muskovit ve serizit türü tali mineral içeriği ile incelenen mermer örneklerinden ayrılmaktadır (Gorgoni ve diğ., 1998; Attanasio, 2003; Capedri ve Venturelli, 2004). Naxos ocaklarındaki mermer örnekleri baskın olarak gri renkli olup, oldukça iri kristalli bir yapıdadır. Mermerleri oluşturan bileşenlerde deformasyon yapıları ve mineral yönlenmeleri tipiktir. Naxos mermerlerinin taze kırık yüzeylerinde kuvvetli şekilde çürük yumurta kokusu hissedilmektedir(Gorgoni ve diğ., 1998; Attanasio, 2003; Capedri ve Venturelli, 2004; Capedri ve diğ., 2004; Ebert ve diğ., 2010). Bu özellikleri ile Tapınak-A yapısında kullanılan mermer örnekleri ile benzerlik gösterse bile apatit, titanit, muskovit, tremolit ve diyopsit' ten oluşan tali mineral içeriği ile Tapınak-A, Hierapolis, Domuzderesi, Afrodisias mermerlerinden ayrılmaktadır.

16) Özellikle Tapınak-A yapısında zemin döşemesi olarak kullanılan gri renkli mermer örnekleri $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ izotop diyagramında Proconnesos ve Thasos ocak bölgeleri içerisine düşmektedir. Tali mineral içerikleri ve maksimum tane boyutları bakımından belirgin farklılıklar görülse de gri renkli mermerlerin Proconnesos ve Thasos bölgelerinden ticaret yolu ile getirilmiş olabileceği muhtemeldir.

17) Sonuç olarak bu tez çalışması ile Laodikeia antik kenti Tapınak-A yapısı mermerlerinin Hierapolis ve Domuzderesi antik ocaklarındaki mermer örnekleri ile mineralojik, petrografik, jeokimyasal ve izotop özellikleri açısından büyük oranda benzeştiği görülmektedir. Sözü edilen antik ocakların Denizli Grabenin kuzey (Hierapolis) ve güney (Domuzderesi) kenarlarında olduğu ve bu kesimlerdeki kaya birimlerinin birbirine benzer oldukları düşünüldüğünde tam olarak kaynak alanı belirtmenin doğru olmayacağı düşünülmektedir. Ayrıca Laodikeia şehrinin tarihte birkaç defa büyük depremlerle yıkıldığı ve şehrin yeniden inşa edildiği düşünülürse her iki ocak bölgesinden de farklı zamanlarda malzeme alınmış olabileceği düşünülebilir.

KAYNAKLAR

Açıkalın, S., 2005. Karacasu çapraz grabeni'nin (Aydın-Batı Anadolu) sedimanter evrimi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 156 s., Eskişehir.

Albustanlıoğlu, T., 2006. Dokimeion Işığı Altında Roma İmparatorluk Döneminde Mermer Kullanımı; İmparatorluk Yönetimindeki Anadolu Mermer Ocaklarının İşletme Stratejisi ve Organizasyonu, Ankara Üniversitesi, Arkeoloji Anabilim Dalı, Klasik Arkeoloji Bilim Dalı, Doktora Tezi, 416 s., Ankara.

Altunel, E., Barka, A., 1996. Hierapolisteki Arkeosismik Hasarların Değerlendirilmesi, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, C.39 sayı 2,65-74.

Akgül, A., Çevik, O., 2005. *İstatistiksel Analiz Teknikleri "SPSS'te İşletme Yönetimi Uygulamaları"*, 456 s., Ankara.

Alçiçek, H., 2007. Denizli Havzası (Sarayköy-Buldan Bölgesi, GB Türkiye) Neojen Çökellerinin Sedimantolojik İncelenmesi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 308 s., Ankara.

Alçiçek, H., Jimenez-Moreno, G. 2013. Late Miocene to Plio-Pleistocene fluvio-lacustrine system in the Karacasu Basin (SW Anatolia, Turkey): Depositional, paleogeographic and paleoclimatic implications, *Sedimentary Geology*, 291:62-83.

Antonelli, F., Lazzarini, L. , Cancellıere, S., Dessandier, D., 2009. Minero-Petrographic and Geochemical Characterization of 'Greco Scritto' Marble from Cap De Garde, Near Hippo Regius (Annaba, Algeria), *Archaeometry* 51, 3, 351–365.

Antonelli, F., Lazzarini, L. , Cancellıere, S., and Dessandier, D., 2010. On The White and Coloured Marbles of The Roman Town of Cuicul (Djemila, Algeria), *Archaeometry* 52, 4, 575–596.

Asgari, N., Matthews, K. J., 1995. The stable isotope analysis of marble from Proconnesos, in *The study of marble and other stones used in the antiquity* (eds. Y. Maniatis, N. Herz, and Y. Basiakos), 123–9, Archetype Publ., London.

Attanasio, D., Armiento G., Brilli M., Emanuele M.C., Platania R., Turi B., 2000. Multimethod marble provenance determinations: the Carrara marbles as a case study for the combined use of isotopic, electron spin resonance and petrographic data, *Archaeometry* 42, 257-272.

Attanasio, D., 2003. *Ancient white marbles: analysis and identification by paramagnetic resonance spectroscopy*, 282 p.,İtaly.

Attanasio, D., Brilli M. and Bruno M., 2008, The Properties and Identification of Marble From Proconnesos (Marmara Island, Turkey): A New Database Including Isotopic, EPR and Petrographic Data, *Archaeometry*, No 50, 747-774.

Bağcı, M., Kibici, Y., Yıldız, A., Akıncı, Ö.T., 2010. Petrographical and Geochemical Investigation of the Triassic Marbles Associated with Menderes Massif Metamorphics, Kavaklıdere, Muğla, SW Turkey, *Journal of Geochemical Exploration*, 107., 39-55.

Best, M. G., 1982, *Igneous and metamorphic petrology*, W. H. Freeman, San Francisco.

Brilli, M., Cavazzini, G., Turi, B., 2005, New Data of $^{87}Sr/^{86}Sr$ Ratio in Classical Marble: An İnitial Database for Marble Provence Determination, *Journal of Archaeological Science*, Elsevier, No 32, 1543-1551 p.

Borghi, A., Vaggelli, G., Marcon, C., Fiora, L., 2009, The Piedmont White Marbles Used in Antiquity: An Archaeometric Distinction Inferred by A Minero-Petrographic and C–O Stable Isotope Study, *Archaeometry*, No 51, 913-931.

Borg, B.E., Borg, G., Strauss, H., 2000. A Combined Isotopic, Petrographic and Archaeological Provenance Study of The Marble Sources for The Apollo Temple Of Didyma, W-Anatolia, D. Et. Al. (Hg.), *Applied Mineralogy İn Research, Economy, Technology, Ecology and Culture*, s. 951-954, Rotterdam.

Buzatu, A., Buzgar N. 2010. The Raman study of single-chain silicates. Anal. Şt. Univ. "Al. I. Cuza" Iaşi, *Geologie*, LVI/1.

Buzgar, N., Apopei, A. I. 2009. The Raman study on certain carbonates. Analele Stiintifice ale Universitatii "Al. I. Cuza" - Iasi, Tome 55, issue 2, 97-112.

Candan, O, Oberhänsli, R., Dora, O.Ö.,Çetinkaplan, M., Koralay, E., Rimmelé, G., Chen, F., Akal, C., 2011. Menderes Masifi'nin Pan-Afrikan Temel ve Paleozoik-Erken Tersiyer Örtü Serilerinin Polimetamorfik Evrimi, *MTA Dergisi*, s.142, 123-167.

Capedri, S., Venturelli G., 2004. Accessory Minerals as Tracers in The Provenancing of Archaeological Marbles, Used in Combination With Isotopic And Petrographic Data, *Archaeometry* 46, 4, 517–536.

Craig H., Craig, V., 1972. Greek Marbles: Determination of Provenance by Isotopic Analysis, *Science*, 176:401-403.

Cramer, T., Germann, K., Winkler, F. J., Schmidt, H.L., 1998, Isotope-Geochemical and Mineralogical-Petrographic Characteristics of The Pergamon Altar Marble, *Isotopes Environmental and Health Studies*, Vol. 34, pp. 169-176.

Demirkıran, Ş., 2010. Kilikya Bölgesi'nden Seçilmiş Antik Mermer Eserlerin Kökeninin Saptanması, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Arkeometri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 77 s., Adana.

Dirik, K., Türkmenoğlu, A., Tuna, N., Dirican, M., 2003. Datça Yarımadası'nın Neotektoniği, Jeomorfolojisi ve Bunların Eski Medeniyetlerin Yerleşimi ve Gelişimi Üzerindeki Etkisi, ODTÜ AFP-00-07-03-13 Kod Nolu Proje.

Duman, B., 2010. Laodikeia Helenistik ve Erken Roma Dönemi Seramiği, Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Arkeoloji Anabilim Dalı, Klasik Arkeoloji Bilim Dalı, Doktora Tezi, 397 s., Konya.

Ebert, A., Gnos, E., Ramseyer, K., Spandler, C., Fleıtmann, D., Bitzios, D., Decrouez, D., 2010. Provenance of Marbles from Naxos Based on Microstructural and Geochemical Characterization, *Archaeometry* 52, 2, 209–228.

Ercan, T., Dinçel, A., Metin, S., Türkecan, A., Günay, E., 1978. Uşak Yöresindeki Neojen Havzaların Jeolojisi, *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, c. 21, 97-106.

Erten, H., 2013. Denizli Karasal Neojen – Kuvaterner Havzasının (Güneybatı Türkiye) Küçük Memeli Fosilleri İle Biyokronolojik İncelemesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 1-148

Faure, G., 2001. Origin of Igneous Rocks, *Springer Verlag*, 496 p., Berlin-Germany.

Germann, K., Holzmann, G., Winkler, F. J., 1980. Determination of marble provenance: limits of isotope analysis, *Archaeometry*, 22, 99- 106.

Goette, H. R., Polykreti, K., Vacoulis, T., Maniatis, Y., 1999. Investigation of the greyish-blue marble of Pentelikon and Hymettus, in *Archéomatériaux*: marbres et autres roches (ed. M. Schvoerer), 83–90, Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux.

Gorgoni, C., Lazzarini, L., Pallante, P., Turi, B., 1998, An Updated and Detailed Minero-petrographic and C-O Stable Isotopic Reference Database for the Main Mediterranean Marbles Used in *Antiquity, Proceedings of the Vth ASMOSIA Conference*, Boston, June 12-15.

Gorgoni, C., Lazzarini, L., Pallante, P., Turi, B., 2002. An updated and detailed mineropetrographic and C–O stable isotopic reference database for the main Mediterranean marbles used in antiquity, in *ASMOSIA 5, interdisciplinary studies on ancient stone: proceedings of the Vth ASMOSIA Conference*, Boston, 12–15 June 1998 (eds. J. Herrmann, N. Herz and R. Newman), 115–31, Archetype, London.

Gökkaya, G., 2008. Denizli ve Dolayının Üç Boyutlu Sismik Hız Yapısının Yerel Deprem Tomografisi Yöntemiyle Belirlenmesi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76 s., Ankara.

Griffith, W. P., 1975. Raman spectroscopy of terrestrial minerals. In Infrared and Raman Spectroscopy of Lunar and Terrestrial Minerals (C. Karr, ed.) *Academic Press*, N.Y., pp. 299-323.

Grossman, E.L., Ku, T.L. 1986. Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: Temperature effects: *Chem. Geol.* (Isot. Geosci. Sect.), v. 59, p. 59-74

Gunasekaran, S., Anbalagan, G., Pandi, S. 2006. Raman and infrared spectra of carbonates of calcite structure, *Journal of Raman Spectroscopy*, 37, p. 892-899.

Gündüz, T., 1999. *İnstrümental Analiz*, Gazi Büro Kitabevi, 607s., Ankara.

Güner, N.İ., Elhatip H., 1999. Pamukkale Yöresi (Denizli) Termal Kaynaklarının Hidrokimyasal ve İzotopik İncelenmesi, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 3 sayı 1, 35-47.

Hancock, P.L., Chalmers, R.M.L., Altunel, E., Çakır, Z., Becher-Hancock, A., 2000. Creation And Destruction of Travertine Monumental Stone by Earthquake Faulting at Hierapolis, Turkey, *The Archaeology of Geological Catastrophes, Geological Society, Special Publications*, 171, 1-14, London.

Harmon, C., Valerie, C. 1972. Greek Marbles: Determination of Provenance by Isotopic Analysis, *Science*, 176: 401-403.

Heinrich, E. W. M., 1956. Microscopic petrography, McGraw-Hill, New York, 296 pp.

Hinterlechner-Ravnik, A., 1971. Pohorske metamorfne kamnine, *Geologija*, 14, 187–226.

Hinterlechner-Ravnik, A., Moine, B., 1977, Geochemical characteristics of the metamorphic rocks of the Pohorje Mountains, *Geologija*, 20, 107–40.

Herz, N., 1985. Isotopic analysis of marble, in *Archaeological Geology*, ed. G. Rapp, Jr., and J. A. Gifford (New Haven: Yale University Press), pp. 331-51.

Herz, N., Dean, N.E., 1986. Stable isotopes and archaeological geology: the Carrara marble, northern Italy, *Appl. Geochem.* 1, 139-151.

Herz, N., 1987, Carbon and Oxygen Isotopic Ratios: A Data Base for Classical Greek and Roman Marble, *Archaeormetry* 29, 35-43.

Herz, N., 1992. Provenance determination of neolithic to classical Mediterranean marbles by stable isotopes, *Archaeometry* 34, 185- 194.

Herz, N., Garrison E.G., 1998. *Geological methods for Archaelogy*, Oxford Üniversity Press, New York.

Jarc, S., Manıatıs, Y., Dotsıka, E., Tambakopoulos, D., Zupancıc N., 2010, Scientific Characterization of The Pohorje Marbles, Slovenia, *Archaeometry* 52, 2, 177–190.

Kantekin, N., 2010. Latmos Bölgesi Taş Ocakları, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Arkeoloji Anabilim Dalı, Klasik Arkeoloji Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 130 s., İstanbul.

Kastelli, M. 1971. Denizli-Sarayköy-Çubukdağ-Karacasu Alanı Jeoloji İncelemesi, MTA Rapor No:4573, Ankara.

Kidd B., Attanasio D.,. Tykot R. H., 2009. Determining White Marble Provenance of Greek and Roman Sculpture in The Museum of Art and Archaeology, University Of Missouri, *Interdisciplinary Studies on Ancient Stone, Proceedings of the IX Association for the Study of Marbles and Other Stones in Antiquity (ASMOSIA) Conference* ,Tarragona.

Kingma, K.J., Hemley, R. 1994. Raman spectroscopy study of microcrystalline silica, *American Mineralogist*, 79: 269-273.

Koralay, T., 2006. İncesu İgnimbiritinin (Kayseri) Jeolojisi, Petrolojisi ve Ayırtman Özellikleri. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, 302 s., Ankara.

Koralay, T., Kadıoğlu, Y. K., 2008. Reasons of different colors in the ignimbrite lithology: Micro XRF and Confocal Raman Spectrometry method, *Spectrochimica Acta* Part A 69:947-955.

Koralay, T., Kadıoğlu, Y., Jiang, S.Y., 2013. Determination of Tourmaline Composition in Pegmatite from Buldan - Denizli (Western Anatolia-Turkey) Using XRD, XRF and Confocal Raman Spectroscopy, *Spectroscopy Letters*, 46:499-506.

Koralay, O.E., Candan, O., Akal, C., Dora, O.Ö., Chen, F., Satır, M, Oberhanslı, R., 2011. Menderes Masifindeki Pan Afrikan ve Triyas Yaşlı Metagranitoyidlerin Jeolojisi ve Jeokronolojisi, Batı Anadolu, Türkiye, *MTA Dergisi*, s.142, 69-121.

Kuzu, Z., 2008, Laodikeia Hamamları, Pamukkale Üniversitesi, Sosyal bilimler Enstitüsü, Arkeoloji Anabilim Dalı, Klasik Arkeoloji Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 127 s.,Denizli.

Lazzarini, L., Antonelli, F., 2003. Petrographic and Isotopic Characterization of The Marble of The Island of Tinos (Greece), *Archaeometry* 45, 4, 541–552.

Mandi, V., Maniatis, Y., Bassiakos, Y., Kilikoglou, V., 1992. Provenance investigation of marbles with ESR spectroscopy: further developments, *Acta archaeologica Lovaniensia Monographiae*, 4, 213–22.

Manfra, L., **Masi, U., Turi, B.,** 1975. Carbon ve Oxygen Isotope Rations of Marbles from Some Ancient Quarries of Western Anatolia and Their Archeological Significance, *Archaeometry*, 17, 215-221.

Maniatis, Y., Tambakopoulos, D., Dotsika, E., 2010, Marble Provenance Investigation of Roman Sarcophagi From Thessaloniki, *Archaeometry*, No 52, 45-58.

Mayo, D. W., Miller, F. A., Hannah, R. W, 2004. Course Notes on the Interpretation of Infrared and Raman Spectra, John Willey&Sons, NewJersey.

Matthews, K. J., Moens L., Walker S., Waelkens M., de Paepe P., 1992. The re-evaluation of stable isotope data for Pentelic marble, in Ancient stones: quarrying, trade and provenance (eds. M. Waelkens, N. Herz, and L. Moens), 203–12, Acta Archaeologica Lovaniensia, *Monograph* 4, Leuven University Press., Leuven.

Matthews, K. J., 1997. The Establishment of A Data Base Of Neutron Activation Analyses of White Marble, *Archoeomerty* 39, 2, 321-332.

Melezhik, V., Gorokhov, I., Fallick, A., Gjelle, S. 2001. Strontium and carbon isotope geochemistry applied to dating of carbonate sedimentation: an example from high-grade rocks of the Norwegian Caledonides, *Precambrian Research*, 108, 267-292.

Melfos, V., 2004, Mineralogical and Stable Isotopic Study of Ancient White Marble Quarries In Larisa, Thessaly, Greece, *Bulletin of the Geological Society of Greece, vol XXXVI, Proceedings of the 10th International Congress*, Thessaloniki.

Melfos, V., Voudouris, P., Papadopoulou, L., Sdrolia, S., Helly, B., 2010. Mineralogical, Petrographic and Stable Isotopic Study Of Ancient White Marble Quarries in Thessaly, Greece - II. Chasanbali, Tempi, Atrax, Tisaion Mountain, *Bulletin of the Geological Society of Greece, Proceedings of the 12th International Congress*, Patras.

McMillan, P.F., 1989. Raman spectroscopy in mineralogy and geochemistry, *Earth Planet. Sci.*, vol.17, p.255 283.

Monna, D., Pensabene, P., 1977, *Marmi Dell'asia Minore, Consiglio Nazionale Delle Ricercehe, Scienze Sussidiarie Dell'archeologia*, 273 p., Roma.

Moens, L., Roos, P., De Rudder, J., Hoste, J., De Paepe, P., Van Hende, J., Marechal, R., Waelkens, M., 1988. White marble from Italy and Turkey: an archaeometric study based on minor and trace-element analysis and petrography, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 123, 333–48.

Muşkara Ü., 2007. Provence Studies on Limestone Archeologicial Artifacts Using Trace Element Analysis (Eser Element Analizi ile Arkeolojik Kireçtaşı Buluntuların Hammadde Kaynağının Saptanması Çalışmaları), ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Arkeometri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 61 s.,Ankara.

Oberhänsli, R., Candan, O., Dora, O.Ö., Dürr, S., 1997, Eclogites within the Menderes Massif / western Turkey, *Lithos* 41, 135-150.

Okay, A., 1986. Denizli-Tavas Arasındaki Bölgenin Jeolojisi, *İTÜ Yerbilimleri ve Yer altı Kaynakları UYG-AR Merkezi*, 14-15.

Özer, A., 2006. Hisarönü (Marmaris) Amforalarının Kökenine Yönelik Jeokimyasal ve Petrografik Yaklaşım, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 48 s.,İzmir.

Özdamar, K., 2004. Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi 1, 649 s., Eskişehir: Kaan Kitabevi.

Özkul, M., Varol B., Alçiçek M.C., 2002. Denizli Travertenlerinin Petrografik Özellikleri ve Depolanma Ortamları, *MTA Dergisi* 125, 13-29.

Özkul, M., Kele, S., Gökgöz, A., Shen, C. C., Jones, B., Baykara, M. O., Fórizs, I., Németh, T., Chang, Y. W., Alçiçek, M.C., 2013. Comparison of the Quaternary travertine sites in the Denizli Extensional Basin based on their depositional and ge ochemical data, *Sedimentary Geology* 294, 179-204.

Prochaska, W., Grillo, S. M., 2010, A New Method for The Determination of The Provenance of White Marbles By Chemical Analysis of Inclusion Fluids: The Marbles of The Mausoleum of Belevi/Turkey, *Archaeometry*, No 52, 59-82.

Pike, S., 1999. Preliminary results of a systematic characterization study of Mount Pentelicon, Attica, Greece, in *Archéomatériaux*: marbres et autres roches (ed. M. Schvoerer), 165-170, Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux.

Pike, S., Herrmann, Jr. J., Herz, N. 2002. A provenance study of calcitic marble from the Archaeological Museum of Thessaloniki. In *ASMOSIA V: Interdisciplinary Studies on Ancient Stone*, J. Hermann, Jr., N. Herz and R. Newman eds., Archetype Publications Ltd., London.

Polikreti, K., Maniatis, Y., 2002. A New Methodology for The Provenance of Marble Based on EPR Spectroscopy, *Archaeometry* 44, 1, 1-21.

Ponti, G. 1996. Ancient Quarrying at Aphrodisias in the Light of the Geological Configuration, In Aphrodisias Papers 3 (C. Roueche and R.R.R. Smith eds.) J. Roman Archaeology Suppementary Serie No: 20, 105-110.

Rockwell, P. 1996. The Marble Quarries: a Preliminary Survey, In Aphrodisias Papers 3 (C. Roueche and R.R.R. Smith eds.) J. Roman Archaeology Suppementary Serie No: 20, 81-103.

Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation, *John Wiley & Sons Inc*. 352p. New York.

Satır, M., Friedrichsen, H., 1986, The origin and evolution of the Menderes massif, W-Turkey: A Rb/Sr and Oxygen isotope Study, *Geol. Rdsch*., 75/3, 703-714.

Sun, S., 1990. Denizli-Uşak Arasının Jeolojisi ve Linyit Olanakları (in Turkish). *Bulletin of Mineral Research and Exploration Institute of Turkey* (MTA), Scientific Report No: 9985.

Şalbaş, A., 2012. Laodikeia Kazılarında Ortaya Çıkarılmış Erken Bizans Dönemine Ait Kazıma Kabartılı Tabaklar ve Bir Uygulama, Dokuz Eylül Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Seramik ve Cam Tasarımı Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi,73 s., İzmir.

Şengör, A.M.C, Yılmaz, Y., 1983.Türkiye'de Tetis'in Evrimi: Levha Tektoniği Açısından Bir Yaklaşım, *Türkiye Jeoloji Kurultayı Yer Bilimleri Özel Dizisi*, 1-75.

Şengör, A.M.C., Satir, M. ve Akkök, R., 1984. Timing of tectonic events in the Menderes Massif, Western Turkey: Implications for tectonic evolution and evidencefor Pan- African basement in Turkey, *Tectonics*, 3, 693-707.

Şimşek, C., 2007. *Laodikeia : Laodikela ad Lycum*, Ege Yayınları, 384 s.

Şimşek, N., 2011. Laodikeia Popülasyonunun Diş ve Çenelerinin Paleopatolojik Açıdan İncelenmesi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Anropoloji (Paleoantropoloji) Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 150 s., Ankara.

Şimşek, Ş. 1984. Denizli-Kızıldere-Tekkehamam-Tosunlar-Buldan-Yenice Alanının Jeolojisi ve Jeotermal Enerji Olanakları, MTA Raporu, No.7846. (Yayınlanmamış).

Şimşek, Ş., Yılmazer, S., 1977, Nazilli-Kuyucak-Yenice (Karacasu) alanının jeolojisi ve jeotermal olanakları, MTA Rapor No. 6390

Taelman, D., Elburg, M., Smet, I., De Paepe, P., Vanhaecke, F., Vermeulen, F., 2013. White, Veined Marble from Roman Ammaia (Portugal): Provenance and Use, *Archaeometry* 55, 3, 370–390.

Tarhan, A.M., 2006. 2002–2003 Yılı Laodikeia Antik Kenti Kabartma Buluntuları, Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Arkeoloji Anabilim Dalı, Klasik Arkeoloji Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 203 s., Denizli.

Tukey, J.W., 1977. Exploratory Data Analysis (First Edition), Reading, Mass: Addison Wesley Publishing Co.

Tokgöz, S., 2008. Bahçeli Roma Havuzu ve Kemerhisar Su Kemerlerinin Jeoarkeolojik İncelenmesi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 94 s., Niğde.

Topal, S., 2012. Denzili Havzasındaki Fayların Tektonik Jeomorfolojisi (GB Türkiye). Pamukkale Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Genel Jeoloji Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Denizli.

Unterwurzacher, M., Polleres, J., Mirwald, P., 2005. Provenance Study of Marble Artefacts from The Roman Burial Area of Faschendorf (Carinthia, Austria), *Archaeometry* 47, 2, 265–273.

Url-1 < http://www.laodikeia.pau.edu.tr >, alındığı tarih 20.07.2013.

Url-2 < http://tr.wikipedia.org/wiki/Kutu_grafiği >, alındığı tarih 25.10.2013.

Url-3 < http://www.bayar.edu.tr/besergil/raman_spektroskopisi.pdf >, alındığı tarih 22.07.2013.

Url-4< http://www.horiba.com/scientific/products/ramanspectroscopy/applicatios >, alındığı tarih 22.07.2013.

Url-5<http://www.kulturvarlikları.gov.tr/TR,44432/pamukkale-hierapolis-denizli.htlm >, alındığı tarih 07.08.2013.

Westaway, R. 1990. Block rotation of western Turkey, *1 Observaional Evidence. J. geophys*. Res.,95, 19857-19884.

Westaway, R. 1993. Neogene evolution of the Denizli region of Western Turkey, *Journal of Structural Geology*, 15, 37-53.

Yavuz, A. B., Bruno, N., Attanasio, D., 2011, An Updated, Multi-Method Database Of Ephesos Marbles, Including White, Greco Scritto And Bigio Varieties, *Archaometry* 53, 2, 215–240.

Yavuz, A.B., Türk, N., Koca, M.Y., 2005, Material properties of the Menderes Massif Marbles from SW Turkey, *Science Direct Engineering Geology* 82, 91– 106.

Yılmaz, Y., Genç, S.C., Gürer, Ö.F., Karacık, Z., Altunkaynak, Ş., Bozcu, M., Yılmaz, K., Elmas, A., 1998. Ege Denizi ve Ege Bölgesinin Jeolojisi ve Evrimi, Türkiye Denizlerinin ve Yakın Çevresinin Jeolojisi (editör N. Görür), s.210-336, İstanbul.

EKLER

Ek A.1 Laodikeia mermer örneklerinin ana oksit ve iz elementlerinin XRF sonuçları

Tablo A.1: Laodikeia Tapınak-A yapısı beyaz renkli lila-mor damarlı mermerlerin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		**LD-1**	**LD-6**	**LD-7**	**LD-11**	**LD-25**	**LD-26**	**LD-27**	**LD-28**	**LD-29**	**LD-30**
Na_2O	**(%)**	0,095	0,094	0,092	0,088	0,094	0,09	0,093	0,094	0,095	0,092
MgO	**(%)**	0,801	0,98	2,788	2,116	3,332	3,2	0,882	1,297	0,9	2,701
Al_2O_3	**(%)**	0,046	0,16	0,721	7,608	0,0297	0,017	0,0763	0,1236	0,0122	0,504
SiO_2	**(%)**	0,3801	0,5377	1,293	9,742	0,2274	0,3953	0,2267	0,3084	0,2693	0,8736
P_2O_5	**(%)**	0,0042	0,0042	0,0046	0,0137	0,0044	0,0043	0,0043	0,0044	0,0042	0,0045
SO_3	**(%)**	0,0584	0,0535	0,0579	0,0962	0,0017	0,0016	0,0016	0,0017	0,0016	0,0017
K_2O	**(%)**	0,007	0,0074	0,0093	1,397	0,0071	0,0066	0,0068	0,0076	0,0068	0,0083
CaO	**(%)**	59,87	58,98	54,38	44,21	55,32	50,24	57,37	56,38	57,13	54,3
TiO_2	**(%)**	0,0025	0,0189	0,0474	0,4591	0,0087	0,0047	0,0095	0,0138	0,0022	0,039
MnO	**(%)**	0,0045	0,0110	0,0142	0,0135	0,0116	0,01131	0,0064	0,0082	0,0071	0,0073
Fe_2O_3	**(%)**	0,2341	0,3246	0,642	1,525	0,4348	0,288	0,1997	0,3837	0,2217	0,421
Cl	**(ppm)**	308,7	173,1	163,8	163,9	245,1	213,8	218,1	289,8	219,9	291,8
V	**(ppm)**	12	12	28,2	38	12	11	11	12	11	26,3
Cr	**(ppm)**	13,7	10	31,4	72,6	17	8,5	14,8	11	17,4	31,5
Co	**(ppm)**	10,2	13	10	20	15,9	8,6	6,3	8,3	15,1	18,5
Zn	**(ppm)**	6,5	4,7	17,1	41,6	11,4	12,4	7,9	10,3	1,6	8,1
Ga	**(ppm)**	1,5	2,5	2,5	9	1,4	1	1,6	2,3	1	3,5
Ge	**(ppm)**	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7
As	**(ppm)**	0,7	0,7	1,5	1,6	1,5	1,5	0,6	0,6	0,6	6,2

Tablo A.1 devam

Örnek No		LD-1	LD-6	LD-7	LD-11	LD-25	LD-26	LD-27	LD-28	LD-29	LD-30
Se	**(ppm)**	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
Br	**(ppm)**	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	1,2	0,5	1,2	0,6	0,6
Rb	**(ppm)**	0,4	1,6	3,1	34,4	0,6	0,4	0,5	0,8	0,7	2,6
Sr	**(ppm)**	201,3	195,2	180,8	137,7	163,8	179,4	116,4	196,1	173,1	174,2
Y	**(ppm)**	4,4	6	7,3	10,2	7	4,9	2,8	3,6	2,7	4,2
Zr	**(ppm)**	8,9	8,2	16,9	98,1	5,9	5,4	5,3	6,3	6	12,3
Nb	**(ppm)**	4,4	3,8	3,6	13,6	3,6	3,4	3,7	3,6	3,5	4
Mo	**(ppm)**	6,6	3,7	3,2	4	3,4	3,2	3,2	3,1	3,2	3,5
Ag	**(ppm)**	1,2	1,2	1,1	0,7	1,2	1,1	1,1	1	1,1	1,1
Cd	**(ppm)**	2	1,2	0,9	0,9	1	1	0,9	1	1	1
In	**(ppm)**	1,1	1	1	0,9	1,2	1	1	1	0,9	1
Sn	**(ppm)**	1,1	0,6	1,9	0,9	1,1	1	1	0,9	0,9	1,6
Sb	**(ppm)**	1	1,1	1,1	1,1	1,1	1	1,1	2,9	1	1,2
Te	**(ppm)**	1,3	1,3	1,3	1,7	1,3	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3
I	**(ppm)**	1,5	2,1	2,2	2,1	2,2	2,2	1,9	2,2	2,2	2,3
Cs	**(ppm)**	3,7	3,7	3,7	3,7	3,8	3,7	3,7	3,7	3,7	3,9
Ba	**(ppm)**	5,4	10	16,9	97,3	5,4	5,4	7,9	5,4	14,2	5,7
La	**(ppm)**	7,4	7,6	7,6	7,6	13,5	7,8	16,4	7,6	7,5	7,8
Ce	**(ppm)**	10	10	10	10,4	10	14,2	10	12,7	15,9	11
Hf	**(ppm)**	4,8	4,4	4,4	4,5	4,4	4,2	4,6	4,4	4,8	4,2
Ta	**(ppm)**	3,4	3,4	3,6	3,4	3,7	3,7	2,9	3,4	3,7	3,7
W	**(ppm)**	5,2	3,5	5	3,7	3,5	3,3	3,6	3,7	3,3	3,4
Au	**(ppm)**	3,2	2,8	3	3,2	2,8	2,7	2,7	2,7	2,8	2,7
Hg	**(ppm)**	1,4	1,5	1,4	1,5	1,3	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3
Tl	**(ppm)**	1,4	1,4	1,2	1,5	1,2	1,1	1,3	1,2	1,2	1,4
Pb	**(ppm)**	3,7	4,4	4,9	8,7	2,9	4,2	3,9	3,3	3,3	3,9
Bi	**(ppm)**	0,5	1	1,1	1	0,7	0,9	1	1	0,9	1,1
Th	**(ppm)**	1,1	1,7	0,5	4,3	0,6	0,9	1	0,7	1,1	1,5
U	**(ppm)**	25,9	22,5	9,6	8,4	9,9	10	9,5	10	9,3	11

Tablo A.2: Laodikeia Tapınak-A yapısı beyaz renkli mermerlerin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		**LD-2**	**LD-4**	**LD-8**	**LD-19**	**LD-20**	**LD-21**	**LD-22**	**LD-23**	**LD-24**	**LD-31**
Na_2O	**(%)**	0,092	0,1	0,096	0,089	0,096	0,095	0,11	0,083	0,11	0,11
MgO	**(%)**	0,039	0,708	0,03	0,026	0,171	1,551	0,382	0,074	0,029	0,863
Al_2O_3	**(%)**	0,0719	0,0598	0,0303	0,0402	0,021	0,0206	0,0506	0,0546	0,0095	0,01
SiO_2	**(%)**	0,4031	0,4195	0,3377	0,201	0,1734	0,1671	0,193	0,1736	0,0936	0,1579
P_2O_5	**(%)**	0,0042	0,0043	0,0041	0,0043	0,0042	0,0043	0,0043	0,0041	0,0042	0,0044
SO_3	**(%)**	0,0546	0,0631	0,0544	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0014	0,0016	0,0017
K_2O	**(%)**	0,007	0,007	0,0068	0,0068	0,0066	0,007	0,0071	0,0068	0,0067	0,0069
CaO	**(%)**	61,32	58,53	62,09	60,75	61,08	57,37	60,66	58,77	62,39	60,26
TiO_2	**(%)**	0,0068	0,0026	0,0027	0,0022	0,0022	0,0022	0,0056	0,0023	0,0023	0,0021
MnO	**(%)**	0,0066	0,0082	0,0011	0,0062	0,0092	0,0111	0,0128	0,0062	0,0021	0,0117
Fe_2O_3	**(%)**	0,0615	0,1098	0,0074	0,0198	0,1079	0,1389	0,0936	0,0734	0,0009	0,1009
Cl	**(ppm)**	147,5	288,7	198,1	190,6	250,4	212,3	238,8	218,4	122,2	277,9
V	**(ppm)**	10,3	11	11	9,8	11	11	11	9,8	10	11
Cr	**(ppm)**	11	11	21,4	10,5	20,8	15	11	10,1	14	16,4
Co	**(ppm)**	4,8	8,3	3,8	4,9	11	10,3	8,7	4,4	3,4	9,6
Ni	**(ppm)**	4,2	4,1	4,3	4,4	4,3	4	4,3	4	4,5	4
Cu	**(ppm)**	1,7	1,6	2	1,7	1,4	1,5	1,4	1,4	1,5	1,4
Zn	**(ppm)**	1	2,6	0,9	1	1	2,2	0,8	4,4	0,9	2,4
Ga	**(ppm)**	1,6	1,9	2,1	1,6	1,9	1,8	2,2	2,1	2,2	2,3
Ge	**(ppm)**	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,4	0,8
As	**(ppm)**	0,8	0,6	0,6	1,1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Se	**(ppm)**	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5
Br	**(ppm)**	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	1,1	0,5
Rb	**(ppm)**	1	1	0,5	0,6	0,4	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5
Sr	**(ppm)**	171,1	137,7	187,3	313,5	186,2	125,4	144,8	160,8	147,5	138

Tablo A.2 devam

Örnek No		LD-2	LD-4	LD-8	LD-19	LD-20	LD-21	LD-22	LD-23	LD-24	LD-31
Y	**(ppm)**	4,6	5	0,7	1	7,8	7,2	4,3	3,5	0,8	6,4
Zr	**(ppm)**	9,5	5,9	6	7,6	6,6	5,9	6,2	6,2	7,9	6,4
Nb	**(ppm)**	4,4	4,2	3,7	3,7	3,9	3,9	4	3,9	4,1	3,8
Mo	**(ppm)**	4	6,5	7,7	3,4	3,5	3,3	3,6	3,5	3,7	3,6
Ag	**(ppm)**	1,3	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3
Cd	**(ppm)**	1,1	1	0,6	1	1,1	0,4	1	0,6	1,1	1,1
In	**(ppm)**	1,1	1	1	1	1,1	1	1	0,9	0,9	1,1
Sn	**(ppm)**	1,2	1,1	1,1	1,2	1	1,1	1,1	1,1	0,8	1,1
Sb	**(ppm)**	1,8	1,1	0,9	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1	1,1
Te	**(ppm)**	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,3	1,4	1,4
I	**(ppm)**	1,6	2,2	2,2	2,2	3,7	2,2	2,3	2	2,3	2,1
Cs	**(ppm)**	3,8	7	3,7	5,4	3,7	3,8	3,8	3,8	3,7	3,9
Ba	**(ppm)**	26,9	18,9	6,7	8,7	5,5	12,6	7,9	19	5,4	9,2
La	**(ppm)**	12,7	14	7,5	7,7	7,7	22,6	7,8	7,7	7,6	7,9
Ce	**(ppm)**	10	10	10	13	12,4	10	16,2	16,5	20,9	21,3
Hf	**(ppm)**	4,9	4,9	4,8	4,7	4,7	4,4	4,7	4,5	4,8	4,7
Ta	**(ppm)**	3,3	3,7	3,6	4,1	3,9	3,8	3,6	3,6	3,7	2,7
W	**(ppm)**	3,4	2,9	4,8	3,5	3,6	3,3	3	6	7,2	6,6
Au	**(ppm)**	2,9	2,9	3	2,8	2,9	2,9	2,6	2,9	3,2	2,8
Hg	**(ppm)**	1,8	1,3	1,4	1,4	1,5	1,4	1,3	1,3	1,4	1,8
Tl	**(ppm)**	1,2	1,3	1,2	1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,3	1,1
Pb	**(ppm)**	7,3	2,7	2,5	2	1,7	3	2,5	2,2	2,8	4,1
Bi	**(ppm)**	1	1	0,9	1	0,8	1	1	0,9	1	1
Th	**(ppm)**	2,5	1,9	1,1	1,1	0,7	1	1,6	1,4	1,2	1,6
U	**(ppm)**	24,3	12	10	11	9,7	15,3	11	13,5	11	10,8

Tablo A.3: Laodikeia Tapınak-A yapısı beyaz renkli gri damarlı mermerlerin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		**LD-3**	**LD-5**	**LD-9**	**LD-12**	**LD-35**	**LD-36**	**LD-37**	**LD-38**	**LD-39**	**LD-40**
Na_2O	**(%)**	0,095	0,1	0,089	0,094	0,097	0,096	0,1	0,1	0,097	0,1
MgO	**(%)**	0,025	0,024	0,023	0,632	1,055	0,405	0,875	0,955	2,02	0,267
Al_2O_3	**(%)**	0,244	0,486	0,224	0,136	0,1247	0,1252	0,1071	0,1015	0,1203	0,0839
SiO_2	**(%)**	0,8158	1,136	0,5738	0,6773	0,4793	0,6085	0,3856	0,3953	0,6245	0,4257
P_2O_5	**(%)**	0,0044	0,0155	0,0043	0,0044	0,0044	0,0042	0,0043	0,0044	0,0043	0,0044
SO_3	**(%)**	0,0523	0,0579	0,048	0,0582	0,0016	0,0016	0,0016	0,0017	0,0016	0,0016
K_2O	**(%)**	0,0078	0,0086	0,0073	0,007	0,0073	0,0072	0,0072	0,0075	0,0072	0,0069
CaO	**(%)**	62,74	62,33	62,64	57,83	59,17	58,13	54,35	58,47	55,37	61,05
TiO_2	**(%)**	0,0198	0,0324	0,0031	0,0087	0,0085	0,0089	0,0054	0,0057	0,0026	0,0024
MnO	**(%)**	0,0293	0,0245	0,0059	0,0033	0,0068	0,0064	0,0059	0,0039	0,0058	0,0043
Fe_2O_3	**(%)**	0,0617	0,0827	0,0565	0,0894	0,1257	0,0783	0,1203	0,0708	0,1384	0,0403
Cl	**(ppm)**	114,4	105,3	122	281,6	398,9	392	363,6	377,9	308,2	389,1
V	**(ppm)**	12	12	11	11	12	11	11	11	22,6	10
Cr	**(ppm)**	14,3	17,4	24,6	14,6	31,8	26	20,5	21	16,5	24
Co	**(ppm)**	4,2	5,1	6,9	7,4	7,1	8,1	5,4	5,2	6,5	4,4
Ni	**(ppm)**	4,4	4,6	4,4	4	4,3	4,4	4	4,3	3,6	4,2
Cu	**(ppm)**	16,2	123,5	1,4	1,8	1,6	1,5	1,6	1,7	1,3	1,6
Zn	**(ppm)**	0,9	0,9	0,9	1,1	1	0,8	1	1,2	0,9	1,1
Ga	**(ppm)**	3,1	2,1	3,1	1,2	2,4	2,5	1,1	1,7	2,9	2,9
Ge	**(ppm)**	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8
As	**(ppm)**	0,4	6,2	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	1	0,6
Se	**(ppm)**	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6
Br	**(ppm)**	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,5	1,2
Rb	**(ppm)**	1,2	1,6	1,1	1,4	1,8	1,3	0,7	1,4	1	0,8
Sr	**(ppm)**	69,2	73,9	89,6	1513	1410	1469	1358	1485	938,5	1256

Tablo A.3 devam

Örnek No		LD-3	LD-5	LD-9	LD-12	LD-35	LD-36	LD-37	LD-38	LD-39	LD-40
Y	**(ppm)**	0,8	2,6	2,2	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8
Zr	**(ppm)**	6,2	12,4	5,4	16,2	11,9	11,4	13	12,8	13,6	10,7
Nb	**(ppm)**	4,6	4,3	3,7	3,4	3,5	3,7	3,5	3,6	3,8	3,9
Mo	**(ppm)**	4,1	3,7	4	3,2	3,3	3,4	2,9	4,7	3,2	3,6
Ag	**(ppm)**	2,7	2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1
Cd	**(ppm)**	1,7	1,6	1	1	0,9	0,6	1	1	1	1,1
In	**(ppm)**	1,2	1	0,9	0,9	1	0,9	1	0,9	0,9	1
Sn	**(ppm)**	1,3	1,4	1	1	1,1	1	0,6	1	1	0,7
Sb	**(ppm)**	1,2	1,4	1,1	1	1,1	1,1	1	1	1	1,1
Te	**(ppm)**	1,4	1,3	2,4	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3
I	**(ppm)**	3,1	1,9	2,2	2,1	2,2	2,2	2,1	2,1	2,5	2,2
Cs	**(ppm)**	3,7	3,7	3,7	3,6	4,4	3,7	3	6,1	3,8	3,7
Ba	**(ppm)**	5,5	25,8	13,2	5,4	5,5	9,4	5,4	12	12,9	17,5
La	**(ppm)**	15,3	7,5	8,8	14,5	7,6	7,5	10,7	7,6	10,7	7,6
Ce	**(ppm)**	13,7	10	10	15,2	13,9	15,3	10	10,4	23,9	10
Hf	**(ppm)**	6,2	10	5,2	4,9	4,8	5	4,7	4,9	4,7	5
Ta	**(ppm)**	5,3	11	3,6	3,6	3,8	3,9	3,6	3,9	3,9	4
W	**(ppm)**	3,4	3,4	7,7	3,9	3,6	3,3	3,6	3,5	3,2	3,7
Au	**(ppm)**	2,9	2,8	3,1	3	3,1	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Hg	**(ppm)**	1,5	1,4	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,4	1,4
Tl	**(ppm)**	1,2	0,9	1,3	1,4	1,3	1,3	1,2	1,3	1,5	1,4
Pb	**(ppm)**	4,1	4	3,5	4,1	3,3	3,9	1,7	1,7	1,4	2,1
Bi	**(ppm)**	1	1,1	1,1	1,2	0,4	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
Th	**(ppm)**	2,9	2,2	2,1	1,3	1,8	1,5	0,4	1,6	1,2	1,2
U	**(ppm)**	24,1	19,8	9,8	11	16,7	8,9	11	8,9	11	13,9

Tablo A.4: Laodikeia Tapınak-A yapısı gri renkli mermerlerin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		**LD-10**	**LD-13**	**LD-14**	**LD-15**	**LD-16**	**LD-17**	**LD-18**	**LD-32**	**LD-33**	**LD-34**
Na_2O	**(%)**	0,087	0,084	0,094	0,087	0,087	0,086	0,091	0,084	0,093	0,086
MgO	**(%)**	0,023	0,024	0,024	0,026	0,023	0,022	0,041	0,023	0,026	0,022
Al_2O_3	**(%)**	0,0979	0,0937	0,0414	0,0486	0,0602	0,0769	0,0314	0,0644	0,0259	0,0665
SiO_2	**(%)**	0,5221	0,4231	0,3255	0,2852	0,3258	0,4124	0,2499	0,3762	0,1877	0,3418
P_2O_5	**(%)**	0,0042	0,0042	0,0042	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0042	0,0043	0,0042
SO_3	**(%)**	0,056	0,0014	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014	0,0015	0,0015	0,0015	0,0014
K_2O	**(%)**	0,0069	0,0069	0,0068	0,0068	0,0068	0,0069	0,0066	0,0069	0,007	0,007
CaO	**(%)**	63,13	61,79	61,75	62,45	62,46	60,83	60,18	61,99	62,71	63,23
TiO_2	**(%)**	0,0028	0,0025	0,0073	0,0025	0,0025	0,0028	0,0021	0,0023	0,0036	0,0044
MnO	**(%)**	0,0035	0,0048	0,0042	0,0057	0,0040	0,0047	0,0044	0,0055	0,0048	0,0014
Fe_2O_3	**(%)**	0,0402	0,0272	0,0130	0,0226	0,0175	0,0224	0,0093	0,0188	0,0074	0,0128
Cl	**(ppm)**	139,5	163,2	170,8	139,9	157,6	222,8	181,9	105,9	182,8	197,2
V	**(ppm)**	11	11	11	10	11	11	10	11	10	11
Cr	**(ppm)**	11	11,5	9,6	13,2	10	9,5	14,3	23	9,8	22,6
Co	**(ppm)**	4	8,8	4	5,6	4,7	4,3	3,5	3,6	5,5	6,1
Ni	**(ppm)**	4,6	4,4	4,4	4,5	4,3	4,5	4,4	4,2	4,3	4,7
Cu	**(ppm)**	1,7	1,6	1,7	1,5	1,8	1,6	1,5	1,6	1,7	1,3
Zn	**(ppm)**	3,6	4,3	6,2	4,2	3,9	4	1	8,2	3,6	5,6
Ga	**(ppm)**	1,6	1	1,1	1,1	1,1	1,6	2,4	1,2	1,2	2,3
Ge	**(ppm)**	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
As	**(ppm)**	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Se	**(ppm)**	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	1
Br	**(ppm)**	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4
Rb	**(ppm)**	0,9	1,3	0,4	1,2	0,8	0,7	0,5	1,8	0,9	1,1
Sr	**(ppm)**	374,3	375,4	394,9	380,6	386,9	348,2	276,4	398,2	318,7	385

Tablo A.4 devam

Örnek No		LD-10	LD-13	LD-14	LD-15	LD-16	LD-17	LD-18	LD-32	LD-33	LD-34
Y	**(ppm)**	0,8	0,8	0,8	0,8	1	0,8	0,7	1,6	0,8	0,8
Zr	**(ppm)**	7,5	6,8	7,6	7,8	7,6	6,8	7	8,2	7,7	9
Nb	**(ppm)**	3,7	3,8	3,6	4,1	3,5	3,5	4	4,2	4,6	4
Mo	**(ppm)**	7,4	5,3	7,1	3,7	3,2	5,3	6,5	2,9	7,7	3,4
Ag	**(ppm)**	1,3	1,4	1	1	1,1	1,1	1,3	1,2	1,3	1,1
Cd	**(ppm)**	1	1	1	1	1	1	1	1	1,1	1,1
In	**(ppm)**	1	1	1	0,9	0,9	0,9	1	1	1	0,9
Sn	**(ppm)**	1,4	1	1	1,1	1,6	1	1,1	0,6	0,4	1,2
Sb	**(ppm)**	0,5	1	0,8	1	1,1	1	1,1	1,1	1,1	1,1
Te	**(ppm)**	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,3	1,4	1,3	1,3
I	**(ppm)**	2,2	2,7	2,2	2,2	2,1	1,5	2,2	3	2,2	2,1
Cs	**(ppm)**	5,1	3,7	3,7	6,2	3,7	4,5	7,5	3,8	5,3	3,6
Ba	**(ppm)**	22,7	12,3	15,4	27,6	24,5	39,3	30,7	18,4	21,6	17,6
La	**(ppm)**	7,6	8,6	11,9	7,7	7,5	7,4	21	16,9	10,7	12,3
Ce	**(ppm)**	10	10	16	12,3	16,5	10	10	19,8	18,4	10
Hf	**(ppm)**	5	4,7	4,9	5	4,9	4,7	4,8	5,1	5,1	4,9
Ta	**(ppm)**	3,9	3,9	3,7	4,2	3,9	3,8	3,9	3,5	4,8	4
W	**(ppm)**	3,5	8,1	4,8	4,6	3,5	11	8,8	8,7	4,7	10,3
Au	**(ppm)**	3,2	3,5	3,2	3,1	3,2	3,5	3,1	3,5	3,1	3,4
Hg	**(ppm)**	1,4	1,3	1,3	1,4	1,4	1,6	1,4	1,4	1,5	1,4
Tl	**(ppm)**	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,4	1,8	1,2
Pb	**(ppm)**	3,8	3,3	1,3	1,2	2,4	2,4	1,6	1,4	2	1,8
Bi	**(ppm)**	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1	1,1	1	1,1	1,3
Th	**(ppm)**	1,1	0,8	1,2	2,2	1,7	2,3	1	3,5	2,4	1,7
U	**(ppm)**	11	11	10	11	10	11	14,7	12	11	10

EK B.1

Tablo B.1: Hierapolis antik ocakları beyaz renkli mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		**HRP-1**	**HRP-2**	**HRP-7**	**HRP-9**	**HRP-18**	**HRP-19**	**HRP-20**	**HRP-28**
Na_2O	**(%)**	0,09	0,096	0,094	0,11	0,11	0,085	0,099	0,083
MgO	**(%)**	1,182	0,741	1,84	0,033	0,763	0,062	0,029	1,054
Al_2O_3	**(%)**	0,0796	0,0459	0,0635	0,0425	0,12	0,0685	0,353	0,0815
SiO_2	**(%)**	0,2366	0,188	0,208	0,178	0,3248	0,2369	0,5291	0,1981
P_2O_5	**(%)**	0,0042	0,0041	0,0043	0,0043	0,0043	0,0041	0,0044	0,0042
SO_3	**(%)**	0,0015	0,0016	0,0015	0,0016	0,0016	0,0015	0,0016	0,0015
K_2O	**(%)**	0,007	0,0071	0,0071	0,007	0,0076	0,0068	0,0078	0,007
CaO	**(%)**	54,84	60	59,31	61,64	57,96	61,57	61,38	57,27
TiO_2	**(%)**	0,0026	0,0064	0,0044	0,0026	0,0209	0,0025	0,0215	0,0024
MnO	**(%)**	0,0135	0,0134	0,0101	0,0137	0,0647	0,0152	0,0234	0,0082
Fe_2O_3	**(%)**	0,2177	0,1629	0,2811	0,143	0,7572	0,1741	0,202	0,1362
Cl	**(ppm)**	355,9	306,1	410,3	183,7	611,6	262,5	240,5	229,9
V	**(ppm)**	10	11	12	11	13	10	12	11
Cr	**(ppm)**	13	24,4	9,4	16,1	15,7	20,9	12	11
Co	**(ppm)**	6,8	15	10,7	11,1	13,2	9,4	9,6	5,5
Ni	**(ppm)**	3,9	4,1	3,9	4,3	4,3	4,3	4,3	4
Cu	**(ppm)**	1,6	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,5	1,4
Zn	**(ppm)**	4,2	20,2	1	1	5,7	1	1	0,7
Ga	**(ppm)**	1,6	1,5	2	2,6	1,4	1,2	2,2	2,4
Ge	**(ppm)**	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,7	0,8
As	**(ppm)**	0,8	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6
Se	**(ppm)**	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5
Br	**(ppm)**	0,8	0,4	0,4	0,4	0,7	0,4	0,8	0,4
Rb	**(ppm)**	1,2	0,8	0,6	1,1	1,1	0,7	1,1	1
Sr	**(ppm)**	331,8	167,3	141,7	131,8	227,9	287,3	136,3	147,2

Tablo B.1 devam

Örnek No		HRP-1	HRP-2	HRP-7	HRP-9	HRP-18	HRP-19	HRP-20	HRP-28
Y	**(ppm)**	7,4	4,4	7,6	5,6	13	6,2	8,8	6,2
Zr	**(ppm)**	6,6	6,2	10,1	6,2	6,6	7,3	6,3	5,2
Nb	**(ppm)**	6	3,8	3,9	4,2	7,4	4,1	4	3,9
Mo	**(ppm)**	6,3	3,9	3,7	3,4	5,8	3,7	3,8	3,7
Ag	**(ppm)**	1,1	1,1	1,3	1,2	1,1	1,1	1,3	1,1
Cd	**(ppm)**	0,5	0,9	1,2	1,1	1,1	1	2,1	0,5
In	**(ppm)**	0,9	1	1,1	0,9	1	1	1,1	0,8
Sn	**(ppm)**	1	1	1,8	1,1	1	0,7	1,1	1,1
Sb	**(ppm)**	1,1	1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1
Te	**(ppm)**	1,2	1,2	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3
I	**(ppm)**	2,2	2,2	2,2	2,3	2,8	2,3	2,2	2,2
Cs	**(ppm)**	3,6	3,7	3,6	3,7	3,7	3,8	3	3,7
Ba	**(ppm)**	36	26,1	15,9	29,3	16,3	5,5	5,4	23,4
La	**(ppm)**	8,6	7,5	7,6	7,8	7,8	11,8	7,6	7,4
Ce	**(ppm)**	17,8	14,5	10	16,1	16,1	10	15,9	11,2
Hf	**(ppm)**	4,1	4,2	4,8	4,8	4,3	5	4,8	4,4
Ta	**(ppm)**	3,4	3,5	3,7	3,6	3,4	3,7	3,8	3,4
W	**(ppm)**	7,4	8,8	8,3	8,4	4,6	13,3	4,9	7,5
Au	**(ppm)**	3,2	3,4	3,2	3,1	3,2	3,7	3	3,1
Hg	**(ppm)**	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,3	1,3
Tl	**(ppm)**	1,3	1,7	0,6	1,2	1,4	1,4	1,3	0,9
Pb	**(ppm)**	8,4	6,5	2,3	3,9	5,4	4,5	2,9	3
Bi	**(ppm)**	1	1	1	1,1	1,1	1,2	1,1	1
Th	**(ppm)**	1	1,8	2	2,4	1,7	1,1	1,9	0,9
U	**(ppm)**	20,7	9,4	21,6	12	11	12	19,5	26,2

Tablo B.2: Hierapolis antik ocakları beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		**HRP-3**	**HRP-4**	**HRP-10**	**HRP-21**	**HRP-22**	**HRP-23**	**HRP-24**
Na_2O	**(%)**	0,1	0,1	0,098	0,091	0,095	0,083	0,088
MgO	**(%)**	0,035	0,091	0,029	0,339	0,41	0,28	0,518
Al_2O_3	**(%)**	0,0117	0,1026	0,285	0,179	0,307	0,355	0,274
SiO_2	**(%)**	0,1867	0,4547	0,8545	0,4041	1,391	0,7425	0,5622
P_2O_5	**(%)**	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043	0,0041	0,0043
SO_3	**(%)**	0,0017	0,0017	0,0015	0,0082	0,0044	0,0066	0,0050
K_2O	**(%)**	0,0071	0,0075	0,0076	0,0074	0,0075	0,0082	0,0078
CaO	**(%)**	61,63	59,75	57,07	60,22	58,75	56,03	59,74
TiO_2	**(%)**	0,00334	0,005	0,0129	0,0025	0,0146	0,0226	0,0248
MnO	**(%)**	0,0099	0,0079	0,0337	0,0159	0,0328	0,0215	0,0161
Fe_2O_3	**(%)**	0,1235	0,1929	0,2515	0,2514	0,6199	0,279	0,2898
Cl	**(ppm)**	318,8	249,5	252	273,4	372,6	137	351,8
V	**(ppm)**	11	11	11	11	11	12	20,3
Cr	**(ppm)**	18	16,5	22,9	17,1	65,4	25,4	21,2
Co	**(ppm)**	8,6	12,4	7,2	13,7	13	17	17,4
Ni	**(ppm)**	4,2	4,4	3,9	4,3	4,3	3,7	4,2
Cu	**(ppm)**	1,7	1,6	1,5	1,4	1,7	1,3	1,7
Zn	**(ppm)**	1	8,4	19,8	2,8	10,3	8,4	5,9
Ga	**(ppm)**	1,7	2,1	1,1	1,5	1,9	3,2	2,5
Ge	**(ppm)**	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8
As	**(ppm)**	0,6	1,1	1	0,6	0,6	1,7	0,7
Se	**(ppm)**	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,9	0,5
Br	**(ppm)**	0,4	1,3	0,4	0,6	0,5	0,7	0,4
Rb	**(ppm)**	0,5	1,4	1,6	1,1	1,5	2,8	1,7
Sr	**(ppm)**	124,1	594,2	269,2	312,7	511,2	172,4	291,1

Tablo B.2 devam

Örnek No		HRP-3	HRP-4	HRP-10	HRP-21	HRP-22	HRP-23	HRP-24
Y	**(ppm)**	6,5	3,3	4,5	3,8	3,6	8,3	3,9
Zr	**(ppm)**	10,6	12,6	6,4	7,4	8,8	9	7,6
Nb	**(ppm)**	4,2	6	3,8	4	3,8	5	3,9
Mo	**(ppm)**	7,8	4	5,2	5,5	3,6	2,2	4,8
Ag	**(ppm)**	1,4	1,4	1,1	1,2	1,2	1	1,2
Cd	**(ppm)**	2,5	1,3	1	1	1	0,9	1,1
In	**(ppm)**	1,2	1,2	0,9	1	1	0,9	0,9
Sn	**(ppm)**	1,2	1,3	1,1	0,8	1,2	1	1,1
Sb	**(ppm)**	1,2	1,2	1	1	1,1	1	1,2
Te	**(ppm)**	1,4	2,1	1,3	1,3	1,4	1,3	1,4
I	**(ppm)**	2,3	2,2	2,2	1,9	2,2	2	2,2
Cs	**(ppm)**	3,8	3,8	3,7	3,7	3,8	3,6	3,8
Ba	**(ppm)**	23,5	14	17,5	5,5	13,1	9	5,6
La	**(ppm)**	12,7	7,7	11,3	7,7	7,7	14,5	7,7
Ce	**(ppm)**	12,6	10	14,1	10	11	12,4	16,7
Hf	**(ppm)**	4,7	4,9	4,5	4,6	4,9	4,4	5,1
Ta	**(ppm)**	3,4	3,9	3,6	3,9	3,6	2,8	4,1
W	**(ppm)**	4,2	8,6	6,7	4,8	17,2	6,8	5,7
Au	**(ppm)**	3	3,7	3,3	3,1	3,9	3,1	3,2
Hg	**(ppm)**	1,4	1,5	1,4	1,4	1,6	1,3	1,5
Tl	**(ppm)**	1,3	1,4	1,3	1,3	0,7	0,8	1,1
Pb	**(ppm)**	3,9	15,5	14,8	9,5	9,4	8,1	5,8
Bi	**(ppm)**	1	1,2	1,1	1,1	1,2	0,9	1,1
Th	**(ppm)**	1,8	2	1,5	2,1	1,2	2	2,3
U	**(ppm)**	17,6	28,3	11	9,3	10	9,2	9,8

Tablo B.3: Hierapolis antik ocakları gri renkli damarlı mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		HRP-5	HRP-6	HRP-8	HRP-11	HRP-12	HRP-13	HRP-14	HRP-15	HRP-16	HRP-17	HRP-29
Na_2O	**(%)**	0,095	0,083	0,099	0,097	0,095	0,087	0,11	0,1	0,097	0,087	0,085
MgO	**(%)**	0,832	0,15	0,193	0,095	0,9	0,104	0,154	0,305	0,032	0,36	0,381
Al_2O_3	**(%)**	0,249	0,939	0,202	0,724	0,54	0,209	0,432	0,661	0,0556	0,351	0,328
SiO_2	**(%)**	0,5656	1,891	0,6395	1,741	1,977	0,9358	1,17	1,558	0,3228	1,475	1,319
P_2O_5	**(%)**	0,0042	0,0043	0,0043	0,0044	0,0047	0,0042	0,0046	0,0044	0,0041	0,0044	0,007
SO_3	**(%)**	0,0109	0,0114	0,0170	0,0312	0,0614	0,0015	0,0073	0,0405	0,0016	0,0491	0,0015
K_2O	**(%)**	0,0078	0,1551	0,0076	0,0089	0,0094	0,0075	0,0091	0,0987	0,0069	0,0081	0,0084
CaO	**(%)**	59,35	55,85	59,91	56,7	55,91	59,82	67,07	57,72	61,33	56,49	60,48
TiO_2	**(%)**	0,0223	0,0501	0,0083	0,0427	0,0328	0,0154	0,0356	0,0342	0,0026	0,0207	0,0164
MnO	**(%)**	0,0209	0,0345	0,0162	0,0246	0,0256	0,0184	0,0275	0,0181	0,0204	0,0307	0,0126
Fe_2O_3	**(%)**	0,3147	0,4873	0,2802	0,5883	0,4648	0,2539	0,315	0,434	0,2703	0,5535	0,1466
Cl	**(ppm)**	338,2	209,7	199,7	304,8	260,1	201,2	228,6	365,5	194,4	385,4	264,2
V	**(ppm)**	27,3	29,7	13	23,7	13	12	13,9	12	11	12	12
Cr	**(ppm)**	38,1	62,1	24,7	30,7	39,1	42	45,9	26,8	29,6	35,7	46,3
Co	**(ppm)**	15,5	16,9	10	20,2	17,7	7,5	15,9	21,9	12,3	28,6	5,9
Ni	**(ppm)**	4,2	3,9	3,9	3,9	3,7	4,2	4,7	3,9	4,4	3,9	4,5
Cu	**(ppm)**	1,7	1,6	1,4	6,8	1,5	1,5	1,9	1,1	1,5	1,6	3,1
Zn	**(ppm)**	17,6	30,8	19,4	50	7	7,3	25,9	18,1	3,1	5,2	8
Ga	**(ppm)**	1,5	1,1	1,3	2,5	3	2,3	3,2	2,7	2,5	1,7	1,4
Ge	**(ppm)**	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9
As	**(ppm)**	1,7	4,4	1,5	1,8	1	0,6	1,2	1,3	0,8	1,2	0,6
Se	**(ppm)**	0,6	0,5	0,9	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,7	0,5	0,5
Br	**(ppm)**	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,8	0,8	0,7	0,6
Rb	**(ppm)**	1,8	5,7	1,5	4,2	4,5	1,7	3,6	4	0,9	1,9	2
Sr	**(ppm)**	317,7	265,9	448,5	303,1	342,8	269,5	314,1	238,4	201,7	387,4	464,7

Tablo B.3 devam

Örnek No		HRP-5	HRP-6	HRP-8	HRP-11	HRP-12	HRP-13	HRP-14	HRP-15	HRP-16	HRP-17	HRP-29
Y	**(ppm)**	3,1	5,9	1,1	7,6	3,5	1,8	3,4	4,1	1,4	6,2	7,6
Zr	**(ppm)**	7,4	6	7,4	13,7	7,5	6,8	7,7	8,7	6,7	8,6	8,5
Nb	**(ppm)**	4,1	3,5	3,6	3,9	4	3,5	4,3	3,7	4,1	4,3	4,2
Mo	**(ppm)**	6,2	3,4	6,4	3,6	3,3	3,2	8,2	6,7	3,5	7,7	3,6
Ag	**(ppm)**	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,3	1,1	1,2	1,7	1,2
Cd	**(ppm)**	1	1	0,8	0,7	1	1	1,1	1	1,1	0,4	1
In	**(ppm)**	0,9	0,9	0,9	0,9	1	0,9	1	0,9	1	0,9	1
Sn	**(ppm)**	1,1	1	1,1	1,1	1	1	1,2	1	1,1	1,1	1
Sb	**(ppm)**	1,1	1,6	1	2,3	0,8	1,1	1,1	1	1,2	1,1	2
Te	**(ppm)**	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,7	1,4	1,4
I	**(ppm)**	1,7	2,1	1,9	2,2	2,2	2,2	2,3	2,2	2,2	1,5	2,2
Cs	**(ppm)**	3,8	3,6	3,7	3,7	4	3,7	3,9	3,7	3,8	3,4	6
Ba	**(ppm)**	79,6	37,3	9	23,3	11,9	57,4	40,8	15,8	20,8	5,5	17,4
La	**(ppm)**	10,3	7,4	7,6	17,8	9,7	15,6	7,8	16	7,7	11,3	18
Ce	**(ppm)**	11,6	12	10	31,1	10	11,1	11,1	24,2	12,6	11	11
Hf	**(ppm)**	4,8	4,4	4,9	5,2	4,6	5	5,4	4,5	5	4,6	5,1
Ta	**(ppm)**	3,8	4,4	3,9	4,6	3,9	3,9	4,3	4	3,6	3,6	4,4
W	**(ppm)**	7,3	9,3	4,5	9,9	6,2	14	12,8	11	9,4	15,9	18,3
Au	**(ppm)**	3,5	3,6	3,4	4	3,3	3,6	3,9	3,6	3,3	3,8	3,9
Hg	**(ppm)**	1,3	1,5	1,6	1,5	1,4	1,4	1,6	1,4	1,5	1,5	1,5
Tl	**(ppm)**	1,4	1,6	1,3	1,4	1,4	1,3	1,1	1,4	1,6	1,3	1,3
Pb	**(ppm)**	15,3	25,1	8,8	22,7	12,3	8,8	16,2	13,7	7,5	10,3	1,9
Bi	**(ppm)**	1,2	0,9	1,1	0,6	1,1	1,1	1,1	1,1	1	1	1,1
Th	**(ppm)**	1,4	2,5	1	1,8	1	2,7	1,2	1,3	2,1	2,4	1,2
U	**(ppm)**	11	13,9	10	10,3	10,6	11	11,2	10	11	11	12

Ek C.1

Tablo C.1: Domuzderesi antik ocakları beyaz renkli mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		DDR-26	DDR-27	DDR-28	DDR-32	DDR-33
Na_2O	**(%)**	0,1	0,098	0,086	0,097	0,085
MgO	**(%)**	0,025	0,026	0,024	0,03	0,246
Al_2O_3	**(%)**	0,1024	0,042	0,0583	0,0388	0,0875
SiO_2	**(%)**	0,3653	0,1489	0,1767	0,1421	0,2279
P_2O_5	**(%)**	0,0043	0,0041	0,0041	0,0041	0,0042
SO_3	**(%)**	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
K_2O	**(%)**	0,0071	0,0067	0,0066	0,0068	0,007
CaO	**(%)**	61,32	62,54	60,77	58,61	56,58
TiO_2	**(%)**	0,0074	0,0024	0,0072	0,0022	0,0035
MnO	**(%)**	0,0059	0,0079	0,0043	0,0099	0,0093
Fe_2O_3	**(%)**	0,0634	0,0671	0,076	0,113	0,1112
Cl	**(ppm)**	274,9	210	184,8	196,8	292,4
V	**(ppm)**	11	9,5	9,7	9,7	10
Cr	**(ppm)**	21,9	10	15	16,6	14,3
Co	**(ppm)**	5,2	4,8	4,9	5,3	5,2
Ni	**(ppm)**	4,2	4,5	4,3	4,2	3,9
Cu	**(ppm)**	1,7	2	1,5	1,5	1,5
Zn	**(ppm)**	0,9	1,2	1	0,9	1
Ga	**(ppm)**	1,1	2,1	0,9	2,4	1,1
Ge	**(ppm)**	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7
As	**(ppm)**	0,6	0,6	0,6	0,8	0,6
Se	**(ppm)**	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Br	**(ppm)**	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4
Rb	**(ppm)**	0,8	0,8	0,6	0,8	0,9
Sr	**(ppm)**	235,1	115	162,9	111,8	117,5

Tablo C.1 devam

Örnek No		DDR-26	DDR-27	DDR-28	DDR-32	DDR-33
Y	**(ppm)**	10,3	6,9	7,5	7,2	6,6
Zr	**(ppm)**	9,8	6	6,1	5,6	5,8
Nb	**(ppm)**	4,1	3,7	4,1	3,6	3,6
Mo	**(ppm)**	8,3	3,5	3,7	3,2	3,3
Ag	**(ppm)**	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1
Cd	**(ppm)**	0,7	1	1	1	0,9
In	**(ppm)**	1	1	1	1	1
Sn	**(ppm)**	1,1	1	1,1	1,1	1,2
Sb	**(ppm)**	1,1	1,1	1	1,1	1
Te	**(ppm)**	1,3	0,9	1,3	1,2	1,4
I	**(ppm)**	2,3	2,2	2,5	2,2	2,2
Cs	**(ppm)**	3,5	3,8	3,7	3,7	3,5
Ba	**(ppm)**	51,1	10	5,5	22,7	5,5
La	**(ppm)**	8,9	7,7	12,6	10,3	17,2
Ce	**(ppm)**	10	10	12,9	9,7	23,9
Hf	**(ppm)**	4,7	5,2	4,6	4,4	4,6
Ta	**(ppm)**	3	3,8	3,8	3,5	3,3
W	**(ppm)**	3,8	3,6	3,9	3,5	3
Au	**(ppm)**	2,6	3	2,5	2,4	2,6
Hg	**(ppm)**	1,3	1,5	1,2	1,3	1,3
Tl	**(ppm)**	1	1,3	1,2	1	1,2
Pb	**(ppm)**	2,4	2,8	2,1	6,8	3,9
Bi	**(ppm)**	0,9	1,1	1	1	1
Th	**(ppm)**	3,1	2,5	1,9	2,4	1,2
U	**(ppm)**	12	11	11,7	11	12

Tablo C.2: Domuzderesi antik ocakları beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		**DDR-15**	**DDR-19**	**DDR-20**	**DDR-21**	**DDR-22**
Na_2O	**(%)**	0,11	0,1	0,099	0,093	0,096
MgO	**(%)**	0,226	0,028	0,027	0,469	1,071
Al_2O_3	**(%)**	0,275	0,186	0,0521	0,341	0,1148
SiO_2	**(%)**	0,5405	0,3398	0,1771	0,8471	0,5273
P_2O_5	**(%)**	0,0045	0,0042	0,0041	0,0044	0,0044
SO_3	**(%)**	0,0017	0,0016	0,0015	0,0016	0,0017
K_2O	**(%)**	0,0081	0,0074	0,0068	0,0081	0,0074
CaO	**(%)**	60,24	61,4	62,98	56,83	59,38
TiO_2	**(%)**	0,0147	0,0143	0,0023	0,0189	0,0029
MnO	**(%)**	0,0076	0,0039	0,0052	0,0329	0,0046
Fe_2O_3	**(%)**	0,0955	0,0508	0,0463	0,7293	0,1138
Cl	**(ppm)**	249,6	109,3	149,4	259,2	249,2
V	**(ppm)**	12	11	11	11	12
Cr	**(ppm)**	20,1	37,3	22,2	19,8	22,2
Co	**(ppm)**	5,2	4,6	7,1	11	12,1
Ni	**(ppm)**	4,3	4,1	4,6	3,9	4,1
Cu	**(ppm)**	1,6	1,7	1,5	1,5	1,6
Zn	**(ppm)**	1	0,8	0,9	2	1
Ga	**(ppm)**	2,5	1,2	1,7	3,1	2,5
Ge	**(ppm)**	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8
As	**(ppm)**	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Se	**(ppm)**	0,5	0,5	0,7	0,5	0,6
Br	**(ppm)**	0,4	0,4	0,5	0,4	0,8
Rb	**(ppm)**	1,8	1	0,5	1,8	1,4
Sr	**(ppm)**	356,2	475,8	462,7	256,7	1664

Tablo C.2 devam

Örnek No		DDR-15	DDR-19	DDR-20	DDR-21	DDR-22
Y	**(ppm)**	4,6	3,6	3,3	5,2	0,9
Zr	**(ppm)**	8,2	8,4	7,9	12,8	13
Nb	**(ppm)**	3,8	4,1	3,7	3,7	3,7
Mo	**(ppm)**	4,2	5	7,3	3,7	3,4
Ag	**(ppm)**	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
Cd	**(ppm)**	1	1,1	0,9	1	1
In	**(ppm)**	1	1	1	1	0,9
Sn	**(ppm)**	0,4	1,8	1,1	1,3	1
Sb	**(ppm)**	1,1	1,1	1	1,1	1
Te	**(ppm)**	1,3	1,4	1,3	1,2	1,3
I	**(ppm)**	2,3	2,2	2,2	2,2	2,3
Cs	**(ppm)**	3,9	3,7	5,8	4,5	3,6
Ba	**(ppm)**	19,1	12,3	5,4	5,4	5,5
La	**(ppm)**	11,6	11,2	19,6	7,5	7,4
Ce	**(ppm)**	13,6	16,9	10	10	10
Hf	**(ppm)**	4,8	6,5	4,7	4,9	5,1
Ta	**(ppm)**	3,8	5,4	3,9	3,6	3,8
W	**(ppm)**	3,4	3	3,5	3,3	3,4
Au	**(ppm)**	2,7	2,7	2,8	2,7	3,1
Hg	**(ppm)**	1,3	1,4	1,4	1,3	1,5
Tl	**(ppm)**	1,3	1,8	1,3	1,3	1,3
Pb	**(ppm)**	2,7	2,5	3,1	4,3	1,9
Bi	**(ppm)**	1	1,1	1,1	1	1,2
Th	**(ppm)**	2,5	1,8	1	3,6	1,4
U	**(ppm)**	9,9	19,7	9,5	13,9	14

Tablo C.3: Domuzderesi antik ocakları gri renkli mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		**DDR-35**	**DDR-37**	**DDR-39**	**DDR-41**	**DDR-43**
Na_2O	**(%)**	0,1	0,084	0,093	0,083	0,081
MgO	**(%)**	0,06	0,479	0,028	0,409	0,237
Al_2O_3	**(%)**	0,184	0,355	0,593	1,58	0,332
SiO_2	**(%)**	0,858	3,501	1,103	3,064	0,8267
P_2O_5	**(%)**	0,0043	0,0046	0,019	0,0045	0,0042
SO_3	**(%)**	0,0016	0,0016	0,0015	0,0948	0,0014
K_2O	**(%)**	0,0071	0,1072	0,0085	0,2278	0,0073
CaO	**(%)**	60,08	53,13	55,56	56,2	54,7
TiO_2	**(%)**	0,0103	0,0405	0,0236	0,1028	0,0151
MnO	**(%)**	0,0239	0,0271	0,0406	0,0188	0,0197
Fe_2O_3	**(%)**	0,3494	0,3013	0,5939	0,848	0,4632
Cl	**(ppm)**	357,1	213,2	141,1	147,8	267,2
V	**(ppm)**	11	11	31,8	14,5	11
Cr	**(ppm)**	12	16,9	12,5	18	22
Co	**(ppm)**	18,4	12,1	21,9	14	14,7
Ni	**(ppm)**	4,3	3,5	3,8	4,1	4
Cu	**(ppm)**	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5
Zn	**(ppm)**	2,1	1,1	6,8	11,8	14,1
Ga	**(ppm)**	1,7	2,5	2,2	4,1	2
Ge	**(ppm)**	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
As	**(ppm)**	0,7	0,8	3,8	2,4	0,5
Se	**(ppm)**	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Br	**(ppm)**	0,7	0,4	0,5	0,4	0,5
Rb	**(ppm)**	1,1	5,7	3,8	9,8	1,6
Sr	**(ppm)**	511,9	1083	769,3	326,6	352,6

Tablo C.3 devam

Örnek No		DDR-35	DDR-37	DDR-39	DDR-41	DDR-43
Y	**(ppm)**	4	4,3	33,9	9,3	7,9
Zr	**(ppm)**	8,4	28,4	9,7	21,8	7,3
Nb	**(ppm)**	3,9	3,8	4,1	4,3	3,9
Mo	**(ppm)**	3,2	3,4	3,5	4,8	4,4
Ag	**(ppm)**	1	1,2	1,2	1,2	1,1
Cd	**(ppm)**	1	1,1	1,1	1,2	1
In	**(ppm)**	0,9	0,9	0,9	1,1	1
Sn	**(ppm)**	0,4	1,1	1,6	0,7	1,1
Sb	**(ppm)**	1	1,2	1,2	1,2	1
Te	**(ppm)**	1,3	1,4	1,2	1,5	1,3
I	**(ppm)**	2,2	2,2	2,2	2,3	2,2
Cs	**(ppm)**	3,7	3,8	7,2	3,9	3,7
Ba	**(ppm)**	5,4	14,8	14,4	30,2	9,9
La	**(ppm)**	8,1	7,8	7,7	15,6	7,8
Ce	**(ppm)**	12,1	12	28,1	16,8	10
Hf	**(ppm)**	4,9	4,6	5,1	4,7	4,6
Ta	**(ppm)**	3,7	3,7	3,6	3,7	3,5
W	**(ppm)**	3,5	13,6	3,3	3,3	5,3
Au	**(ppm)**	3,1	3,4	3,1	3,1	3,1
Hg	**(ppm)**	1,4	1,6	1,3	1,5	1,4
Tl	**(ppm)**	1,4	1,3	1,5	1,5	0,9
Pb	**(ppm)**	3,5	5,9	17,4	8,9	7,3
Bi	**(ppm)**	1,2	1	1,2	1,1	1
Th	**(ppm)**	1,2	1,4	4,5	2	2
U	**(ppm)**	11	10,4	9,5	12	9,6

Ek D.1

Tablo D.1: Afrodisias antik ocakları beyaz renkli mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		AFD-10	AFD-18	AFD-19	AFD-22	AFD-26
Na_2O	**(%)**	0,093	0,092	0,088	0,096	0,1
MgO	**(%)**	0,027	0,026	0,023	0,123	0,031
Al_2O_3	**(%)**	0,0213	0,0337	0,0101	0,537	0,0096
SiO_2	**(%)**	0,18	0,3419	0,0983	0,992	0,1138
P_2O_5	**(%)**	0,0041	0,004	0,004	0,0044	0,0044
SO_3	**(%)**	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0016
K_2O	**(%)**	0,0067	0,0065	0,0064	0,007	0,0069
CaO	**(%)**	61,51	59,76	61,54	61,43	61,54
TiO_2	**(%)**	0,0022	0,002	0,0019	0,0025	0,0022
MnO	**(%)**	0,0010	0,0029	0,0026	0,0051	0,0047
Fe_2O_3	**(%)**	0,0130	0,0035	0,0035	0,1345	0,0409
Cl	**(ppm)**	222,7	159,1	103	186,3	294,5
V	**(ppm)**	10	9,8	9,7	9,6	10
Cr	**(ppm)**	11	11,5	8,8	43,5	10
Co	**(ppm)**	3,8	4	3,4	5,2	4,4
Ni	**(ppm)**	4,3	4,3	4,2	4,2	4,5
Cu	**(ppm)**	1,6	1,5	1,8	44,2	1,4
Zn	**(ppm)**	2	0,9	1	0,9	0,9
Ga	**(ppm)**	1,9	2	1,1	1,8	2,3
Ge	**(ppm)**	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
As	**(ppm)**	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6
Se	**(ppm)**	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Br	**(ppm)**	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Rb	**(ppm)**	0,9	0,5	0,4	0,9	0,5
Sr	**(ppm)**	180,7	129,2	87,7	96,5	136,7

Tablo D.1 devam

Örnek No		AFD-10	AFD-18	AFD-19	AFD-22	AFD-26
Y	**(ppm)**	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8
Zr	**(ppm)**	6,4	5,8	4,8	6,7	5,5
Nb	**(ppm)**	4	3,7	3,3	4,6	3,7
Mo	**(ppm)**	3,9	3,4	3,2	4,4	3,4
Ag	**(ppm)**	1,1	0,8	1	1,5	1,1
Cd	**(ppm)**	1,1	1	0,9	0,8	1
In	**(ppm)**	1	0,9	0,9	1,2	0,9
Sn	**(ppm)**	1,1	1	1	1	0,4
Sb	**(ppm)**	1,1	1,1	1,1	0,9	1
Te	**(ppm)**	1,3	1,3	2,4	1,5	1,3
I	**(ppm)**	2,2	2,2	2,2	2,3	2,2
Cs	**(ppm)**	3,7	3,7	3,6	3,8	3,7
Ba	**(ppm)**	5,5	7,5	5,3	5,5	8,7
La	**(ppm)**	9,3	12	7,4	13,2	15,9
Ce	**(ppm)**	12,7	10	10	10	10
Hf	**(ppm)**	4,7	4,8	4,8	7	4,7
Ta	**(ppm)**	3,6	3,6	3,3	7,5	3,6
W	**(ppm)**	3,5	4	3,1	3,9	3,1
Au	**(ppm)**	2,8	2,5	2,7	2,7	2,5
Hg	**(ppm)**	0,7	1,2	1,3	1,3	1,3
Tl	**(ppm)**	0,9	1,2	1,3	1,4	1,3
Pb	**(ppm)**	3,9	1,8	1,9	1,8	2
Bi	**(ppm)**	1,1	0,9	0,9	1	1
Th	**(ppm)**	1,1	2	2,8	1,8	1,5
U	**(ppm)**	10	9,8	10	18,2	8,3

Tablo D.2: Afrodisias antik ocakları beyaz renkli gri damarlı mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		**AFD-12**	**AFD-16**	**AFD-20**	**AFD-23**	**AFD-27**
Na_2O	**(%)**	0,1	0,1	0,089	0,094	0,086
MgO	**(%)**	0,03	0,033	0,051	0,027	0,197
Al_2O_3	**(%)**	0,0934	0,0916	0,239	0,217	0,905
SiO_2	**(%)**	0,2691	0,4147	0,4972	0,6113	1,61
P_2O_5	**(%)**	0,0042	0,0044	0,0041	0,0042	0,0043
SO_3	**(%)**	0,0016	0,0017	0,0015	0,0016	0,0015
K_2O	**(%)**	0,0071	0,0076	0,0078	0,0074	0,223
CaO	**(%)**	61,01	61,58	59,66	59,14	60,03
TiO_2	**(%)**	0,0065	0,0078	0,0115	0,0101	0,0402
MnO	**(%)**	0,0048	0,0032	0,0090	0,0163	0,0111
Fe_2O_3	**(%)**	0,0678	0,08	0,1692	0,1299	0,4079
Cl	**(ppm)**	211,8	149,3	97,8	157,7	104,5
V	**(ppm)**	24,5	11	11	10	14
Cr	**(ppm)**	21,9	9,7	10,1	17,6	29,7
Co	**(ppm)**	4,6	7,8	9	12,2	11,7
Ni	**(ppm)**	4,3	4,4	4,2	3,9	4,1
Cu	**(ppm)**	1,5	1,4	1,4	1,5	1,5
Zn	**(ppm)**	1,8	1,2	0,9	3,2	4,2
Ga	**(ppm)**	1,9	2,2	1,5	1,1	3,7
Ge	**(ppm)**	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
As	**(ppm)**	0,6	0,7	4	0,7	1,1
Se	**(ppm)**	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Br	**(ppm)**	1	0,4	0,4	0,4	0,7
Rb	**(ppm)**	1,4	1,8	2,3	2	9,8
Sr	**(ppm)**	120,5	242,8	189,6	102,1	181

Tablo D.2 devam

Örnek No		AFD-12	AFD-16	AFD-20	AFD-23	AFD-27
Y	**(ppm)**	0,8	0,8	1,3	2,8	2
Zr	**(ppm)**	5,6	14,5	6,1	11,2	23,3
Nb	**(ppm)**	4	4,5	3,7	4,2	4,5
Mo	**(ppm)**	3,3	4,3	3,6	3,8	7,9
Ag	**(ppm)**	1,1	1,4	1,1	1,3	1,3
Cd	**(ppm)**	1,1	1,9	1	1,4	0,9
In	**(ppm)**	0,9	1,1	0,8	1,2	1,7
Sn	**(ppm)**	1,1	2,7	1	1,2	1,2
Sb	**(ppm)**	1,1	1,2	1,1	1,9	1,2
Te	**(ppm)**	1,6	1,3	1,2	1,3	1,4
I	**(ppm)**	4,1	4,7	4	2,2	2,3
Cs	**(ppm)**	3,8	3,8	3,7	3,7	4
Ba	**(ppm)**	5,5	5,3	5,4	6,6	24,2
La	**(ppm)**	7,7	7,7	7,6	7,5	13,7
Ce	**(ppm)**	9,6	17,3	10	12,3	16,7
Hf	**(ppm)**	4,8	4,5	4,5	4,1	4,8
Ta	**(ppm)**	3,6	3,8	4	3,3	3,7
W	**(ppm)**	3,6	3,3	3,4	3,1	3,8
Au	**(ppm)**	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8
Hg	**(ppm)**	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3
Tl	**(ppm)**	1,2	1,5	1,3	0,9	1,4
Pb	**(ppm)**	1,9	3,9	2,1	4,2	2,1
Bi	**(ppm)**	1	1,2	0,9	1	0,6
Th	**(ppm)**	1,9	1,7	1,6	2	2,1
U	**(ppm)**	8,7	41,9	11	24,4	19,3

Tablo D.3 : Afrodisias antik ocakları gri renkli mermer örneklerinin ana oksit ve bazı iz element analiz sonuçları

Örnek No		**AFD-5**	**AFD-15**	**AFD-21**	**AFD-24**	**AFD-25**
Na_2O	**(%)**	0,1	0,093	0,1	0,083	0,09
MgO	**(%)**	0,03	0,029	0,031	0,027	0,051
Al_2O_3	**(%)**	0,0607	0,374	0,25	0,1331	0,524
SiO_2	**(%)**	0,2393	0,7929	0,595	0,324	0,9402
P_2O_5	**(%)**	0,0043	0,0042	0,0043	0,0042	0,0042
SO_3	**(%)**	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0016
K_2O	**(%)**	0,0072	0,0084	0,0077	0,0074	0,0085
CaO	**(%)**	61,55	58,5	60,61	60,63	59,46
TiO_2	**(%)**	0,0041	0,022	0,0125	0,0024	0,0261
MnO	**(%)**	0,00492	0,01817	0,00947	0,00978	0,0122
Fe_2O_3	**(%)**	0,0468	0,2538	0,2037	0,152	0,1928
Cl	**(ppm)**	177,1	201,1	217,7	160,3	120,1
V	**(ppm)**	11	12	11	9,7	11,1
Cr	**(ppm)**	10	16,6	11	12,2	9,5
Co	**(ppm)**	4,5	13	6,8	7,9	7,6
Ni	**(ppm)**	4,4	4,1	4,3	4,4	4,1
Cu	**(ppm)**	1,5	1,4	1,5	1,5	1,4
Zn	**(ppm)**	1	3	1	2,2	2,3
Ga	**(ppm)**	1,6	2,2	1,8	1,9	2,9
Ge	**(ppm)**	0,8	0,6	0,7	0,8	0,8
As	**(ppm)**	0,6	3,8	0,6	0,5	1
Se	**(ppm)**	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5
Br	**(ppm)**	0,5	0,5	0,7	0,9	0,5
Rb	**(ppm)**	1,2	4,3	2,4	1,4	3,3
Sr	**(ppm)**	166,6	165,1	184,4	159,8	221,8

Tablo D.3 devam

Örnek No		AFD-5	AFD-15	AFD-21	AFD-24	AFD-25
Y	**(ppm)**	0,8	2,1	0,8	1,7	1,5
Zr	**(ppm)**	5,5	6,5	5,8	6,3	15,5
Nb	**(ppm)**	3,2	3,8	3,4	4,1	4
Mo	**(ppm)**	2,8	3,3	2,7	6,6	3,6
Ag	**(ppm)**	1,2	1,1	1,2	0,8	0,4
Cd	**(ppm)**	0,6	1	0,9	1,9	1
In	**(ppm)**	1	1	1	1,1	0,7
Sn	**(ppm)**	1,1	0,5	1	1,2	1,1
Sb	**(ppm)**	1,1	1,1	1	1,1	1,1
Te	**(ppm)**	1,3	1,3	1,2	1,4	1,4
I	**(ppm)**	2,3	2,2	2,2	2,2	3,4
Cs	**(ppm)**	5,3	3,8	3,7	3,7	7,3
Ba	**(ppm)**	5,6	15,2	5,3	5,9	5,5
La	**(ppm)**	7,8	7,7	7,5	8,4	7,6
Ce	**(ppm)**	15,9	10	10	11	19,2
Hf	**(ppm)**	4,8	4,4	4,9	4,5	4,9
Ta	**(ppm)**	3,9	3,6	3,8	4	3,8
W	**(ppm)**	4,1	3,2	3,4	3,3	3
Au	**(ppm)**	2	2,5	2,6	3	2,9
Hg	**(ppm)**	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4
Tl	**(ppm)**	1,1	0,9	1,2	1,4	1,3
Pb	**(ppm)**	1,2	4,5	2,1	2,1	3,8
Bi	**(ppm)**	1	1	0,4	1,1	1
Th	**(ppm)**	2,5	3,3	1,4	1,5	1,6
U	**(ppm)**	11	10	11	15,5	11

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad:

Sanem KILINÇARSLAN

Doğum Yeri ve Tarihi:

Denizli- 08.03.1980

Adres:

Akkonak Mah. Köprü Sitesi No:3/12 Denizli

Lisans Üniversite:

Pamukkale Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü (2002)

Yayın Listesi:

Tez çalışması I.Uluslararası Arkeoloji Sempozyumunda sunulmuştur.

Laodikeia 10.Yıl Kazı Bandında yayınlanacak olan dergiye gönderilmiştir ve basım aşamasındadır.