



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Afyon menekşe mermerinin (iscehisar-afyonkarahisar) roma döneminden günümüze önemi, karakterizasyonu, tuz kristalleşmesi ve donma-çözülme testleriyle dayanıklılığının değerlendirilmesi

The significance of afyon violet marble (iscehisar-afyonkarahisar) from the roman age until today, its characterisation, and evaluation of durability by salt crystallization and freezing-thawing tests

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa Yavuz ÇELİK¹, Murat SERT²

ORCID¹: 0000-0002-9695-7370

ORCID²: 0000-0001-6595-1681

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çelik M. Y. ve Sert M., “Afyon menekşe mermerinin (iscehisar-afyonkarahisar) roma döneminden günümüze önemi, karakterizasyonu, tuz kristalleşmesi ve donma-çözülme testleriyle dayanıklılığının değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 24(3): 785-796, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.673694

Afyon Menekşe Mermerinin (İscehisar-Afyonkarahisar) Roma Döneminden Günümüze Önemi, Karakterizasyonu, Tuz Kristalleşmesi Ve Donma-Çözülme Testleriyle Dayanıklılığının Değerlendirilmesi

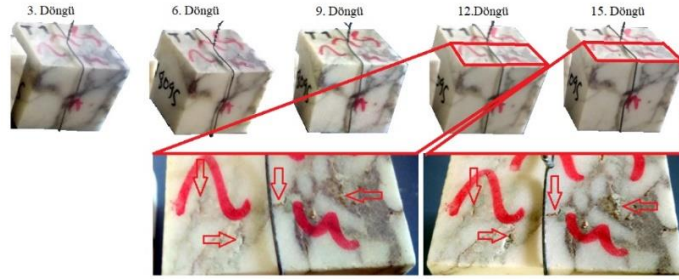
The Significance of Afyon Violet Marble (İscehisar-Afyonkarahisar) from the Roman Age Until Today, Its Characterisation, and Evaluation of Durability by Salt Crystallization and Freezing-Thawing Tests

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Afyon Menekşe mermerinin önemi (The significance of Afyon Violet (Pavonazzetto) marble)
- ❖ Tuz kristalleşmesi ve donma-çözülme testleri (Salt crystallization and freezing-thawing tests)
- ❖ Afyon Menekşe mermerinin karakterizasyonu (Characterisation of Afyon Violet marble)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermerinin Roma dönemindeki önemi açıklanmış ve karakterizasyonu yapılmıştır. Tuz kristalleşme ve donma-çözülme deneyleri yardımıyla dayanıklılığı değerlendirilmiştir. (The importance of Afyon Menekşe (Pavonazzetto) marble in Roman period was explained and its characterization was done. Its durability was evaluated with the help of salt crystallization and freeze-thaw experiments.)



Şekil. Tuz kristalleşmesine direncin tayini deneylerinde Afyon Menekşe mermer örneklerinin döngülere göre görünümü./**Figure.** (The view of Afyon Violet marble samples according to cycles in resistance to salt crystallization tests)

Amaç (Aim)

Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermerinin duraylılığını belirlemek. / To determine the durability of Afyon Violet (Pavonazzetto) marble.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kimyasal, mineralojik, petrografik ve fiziko-mekanik test ve analizler ile tuz kristalleşmesi ve donma-çözülme deneyleri yürütülmüştür. / Chemical, mineralogical, petrographic and physico-mechanical tests and analyzes, with salt crystallization and freeze-thaw experiments were carried out.

Özgünlük (Originality)

Antik dönemlerden beri kullanılan Afyon Menekşe mermerinin tarihsel önemini ortaya koymaktadır. / It reveals the historical importance of Afyon Violet marble, which has been used since ancient times.

Bulgular (Findings)

Tuz kristallendirme ve donma-çözülme deneylerinden sonra, ultrasonik dalga hızı% 23.83 ve% 13.3 azaldı, tek eksenli basınç dayanımı değerleri sırasıyla% 15.97 ve% 20.11 azaldı. / After the salt crystallization and freeze-thaw experiments, the ultrasonic wave velocity decreased by 23.83% and 13.3%, uniaxial compressive strength values decreased by 15.97% and 20.11%, respectively.

Sonuç (Conclusion)

Ayrışma deneylerinden sonra Afyon Menekşe mermer numunelerinin fiziksel bütünlüğü bozulmamıştır. / It was observed that the physical integrity of Afyon Violet marble samples did not deteriorate after the weathering tests.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Afyon Menekşe Mermerinin (İscehisar-Afyonkarahisar) Roma Döneminden Günümüze Önemi, Karakterizasyonu, Tuz Kristalleşmesi ve Donma-Çözülme Testleriyle Dayanıklılığının Değerlendirilmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mustafa Yavuz ÇELİK^{1*}, Murat SERT²

¹Afyon Meslek Yüksek Okulu, Doğal Yapı Taşları Programı, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 12.01.2020 ; Kabul/Accepted : 07.05.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 07.05.2020)

ÖZ

Mermer, antik çağların en önemli yapı malzemelerinden birisidir. Özellikle Roma İmparatorluğu döneminde mermer kullanımı artmıştır. Roma döneminde önemli anıtsal yapılarda kaliteli mermere ihtiyaç duyulması nedeniyle birçok mermer ocağı açılmıştır. Bu ocaklardan birisi de Docimium (İscehisar-Afyonkarahisar) mermer ocağıdır. Bu ocaktan ince taneli beyaz (Afyon kaymak) ve morumsu-kırmızı renkli (Afyon Menekşe) mermerleri çıkarılmıştır. Bu mermerler, Efes limanından birçok Roma şehrine gönderilmiş ve Roma döneminde birçok anıtsal ve önemli yapıda kullanılmıştır. Bu çalışmada, antik dönemlerden beri uluslararası öneme sahip olan Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermeri incelenmiştir. Çalışma üç aşamada ele alınmıştır. Birinci aşamada Afyon Menekşe mermerinin Roma dönemindeki önemi açıklanmış, ikinci aşamada karakterizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla kimyasal, mineralojik-petrografik (polarize mikroskop, XRD, SEM), fiziksel ve mekanik testler/analizler yapılmıştır. Üçüncü aşamada ise Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermerinin, tuz kristalleşme ve donma-çözülme deneyleri yardımıyla dayanıklılığı değerlendirilmiştir. Elde edilen verilere göre mermerlerin, tuz kristalleşmesi ve donma-çözülme deneyleri sonrasında ultrasonik dalga hızı ilerlemesi sırasıyla %23,83 ve %13,3, tek eksenli basınç dayanımı değerleri %15,97 ve %20,11 oranında azalmıştır. Yaşlandırma deneyleri sonrasında meydana gelen ayrışmaların breşik yapıda yer alan flogopit ve muskovit gibi mika ve illit gibi kil minerallerinden kaynaklandığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Afyon menekşe mermeri, iscehisar, durabilite, tuz kristalizasyonu, donma-çözülme.

The Significance of Afyon Violet Marble (İscehisar-Afyonkarahisar) from the Roman Age Until Today, Its Characterisation, and Evaluation of Durability by Salt Crystallization and Freezing-Thawing Tests

ABSTRACT

Marble is one of the most important building materials of antiquity. Especially during the Roman Empire, the use of marble increased. In the Roman period, many marble quarries were opened due to the need for quality marble in important monumental buildings. One of these quarries is Docimium (Iscehisar-Afyonkarahisar) marble quarry. Fine-grained white (Afyon cream) and purplish-red colored (Afyon violet) marbles were extracted from this quarry. These marbles were sent from the port of Ephesus to many Roman cities and were used in many monumental and important buildings during the Roman period. In this study, Afyon violet (Pavonazzetto) marble, which has been of international importance since ancient times, was investigated. In the first stage, the importance of Afyon violet marble in the Roman period was explained and in the second stage the characterization study was made. For this purpose, chemical, mineralogical-petrographic (polarized microscope, XRD, SEM), physical and mechanical tests / analyzes were performed. In the third stage, the durability of Afyon violet (Pavonazzetto) marble was evaluated with the help of salt crystallization and freeze-thaw experiments. According to the experimental data, after the salt crystallization and freeze-thaw experiments, the ultrasonic wave velocity decreased by 23,83% and 13,3%, uniaxial compressive strength values decreased by 15,97% and 20,11%, respectively in the marble samples. It has been determined that the deterioration in the brecciated structure of the marble is caused by mica minerals such as phlogopite, muscovite and clay (illite) minerals.

Keywords: Afyon violet marble, iscehisar, durability, salt crystallization, freezing-thawing.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : mycelik@aku.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mermer, kireçtaşlarının metamorfizmasına bağlı olarak sıcaklık ve basınca maruz kaldığında oluşan bir

metamorfik kayadır. Çoğunlukla kalsit (CaCO_3) mineralinden oluşur ve az oranda kil mineralleri, mikalar, kuvars, pirit, demir oksitler ve grafit gibi başka mineraller içerebilir. Metamorfizma koşulları altında, kireçtaşında bulunan kalsit mineralleri, birbirine sıkıca bağlı olan ve büyüyen kalsit kristallerinden yeni bir kayaç oluşturmak üzere yeniden kristalleşir.

Doğal yapı taşları, antik çağlardan beri yapı taşı ve dekoratif amaçlı olarak kullanılmıştır. Bu amaçlar için kireçtaşı, kumtaşı, mermer, granit, serpantin gibi pek çok yapı taşı tercih edilmiştir. Hiç şüphesiz mermer, özellikle anıtsal, dini ve önemli yapıların inşaatında en öne çıkan yapı taşı olmuştur. Beyaz ve renkli mermerler, antik çağların en gözde yapı ve dekorasyon malzemesi olarak bilinmektedir. Neolitik çağdan bu yana, özellikle Greko-Romen döneminde gelişen ve sürekli artan oranda mermer madenciliği faaliyetleri yürütülmüştür. Klasik zamanlarda neredeyse tüm önemli Roma ve Yunan heykelleri ile çoğu anıtsal yapılar mermerden yapılmıştır [1, 2].

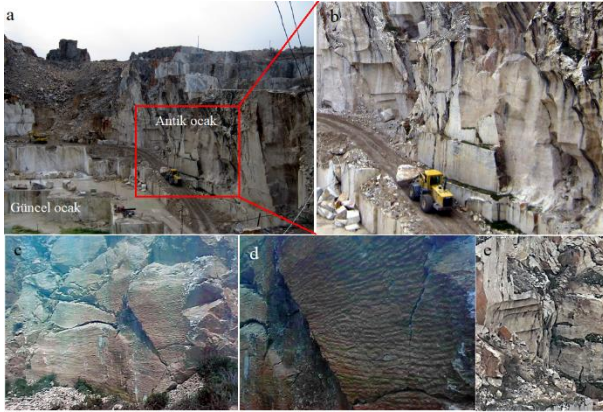
Günümüzde Alp-Himalaya kuşağında bulunan İspanya, İtalya, Yunanistan, Türkiye, İran ve Pakistan gibi ülkelerde çok zengin mermer yatakları bulunmaktadır. Antik çağlarda Akdeniz bölgesinde, mermer olan talebin yüksek olması özellikle İtalya, Yunanistan ve Batı Anadolu'da birçok mermer ocağı açılmasına yol açmıştır [2]. Jeolojik konumunun bir sonucu olarak, çeşitli renk ve desenlerde çok zengin mermer rezervlerine sahip olan Anadolu'da da Antik Roma döneminde çok sayıda mermer ocağı açılmıştır. Renk, desen ve blok almaya uygun kütle özellikleri nedeniyle Batı Anadolu mermerleri yaygın olarak kullanılmıştır. Günümüzde Batı Anadolu'da faaliyet gösteren mermer ocaklarının büyük bir kısmı, Roma döneminde kullanılmış olan antik mermer ocaklarının devamı niteliğindedir [3]. Antik mermer ocaklarının bulunduğu bazı bölgeler Aydın, İzmir, Kütahya, Afyonkarahisar ve Marmara Adası olmakla birlikte, Anadolu'da Antik dönemlerde en yaygın kullanılan mermerlerin Docimium (İscehisar-Afyonkarahisar) ve Proconnesium (Marmara Adası) olduğu bilinmektedir [4].

Günümüzdeki İscehisar mermerleri, antik çağlarda Docimaeon, Phrygium veya Synnadic (modern Şuhut) mermeri adıyla bilinmektedir. Docimium (İscehisar-Afyonkarahisar) ocağında, çeşitli renklerde mermerler bulunmasına rağmen çok yaygın olarak ince taneli beyaz (Afyon kaymak) ve morumsu-kırmızı renkli (Afyon Menekşe) mermerleri çıkarılmıştır. Morumsu-kırmızı renkli matrisinde beyaz mermer parçaları içeren breşik yapıya sahip mermer, antik dönemlerde Pavonazzetto mermeri adıyla ünlenmiştir [5]. Pavonazzetto (Afyon Menekşe) mermerleri antik çağda oldukça saygın ve çok popülerdi. Çağdaş standartlara göre çok pahalı yapı malzemeleri olarak değerlendirilmektedir. Esas olarak Roma İmparatorluğu döneminde ve daha sonra Bizans döneminde renkli mimari malzemeler için kullanılmıştır [6]. Kesin olmamakla birlikte birbirleri ile kıyaslama imkânı olması bakımından antik dönemlerdeki mermer fiyatları hakkında Diocletian fiyat listesi (Diocletian's

Edict) bir fikir vermektedir. Söz konusu liste M.S. 301'de kullanılan 19 adet mermerin maksimum fiyatlarını içermektedir. Renkli mermerlerin fiyatları, beyaz mermerlere (40 dinar) göre yaklaşık iki kat (75 dinar) ile altı kat (250 dinar) arasında değişmekteydi. Pavonazzetto mermerinin fiyatı 200 dinar idi. Diocletian tarafından yayımlanan Fiyatlar listesinde belirtilen en yüksek fiyatlı mermer olmasına rağmen, pavonazzetto mermerinin büyük bir popülaritesi vardı [7, 8].

İscehisar (Docimium) mermer ocakları, eski zamanlardan beri binlerce yıldır çalışmaktadır. En yoğun çalışmaların Roma döneminde yapıldığı Docimium (İscehisar-Afyonkarahisar) ocağında, o günlerden günümüze 200 m uzunluğunda, 80-110 m genişliğinde ve 40-50 m derinliğinde bir çukur bırakılmıştır [6, 9]. Docimium (İscehisar-Afyonkarahisar) ocağında, güncel mermer ocak işletmeciliğinin yayılmacı tehdidine rağmen az da olsa antik taş kesme izleri hala görülmektedir (Şekil 1). İscehisar mermer ocağında terk edilmiş, basit el aletleri ile kesilerek çıkarılmış ve yarı işlenmiş çeşitli ebatlardaki bloklar, arşitravlar, lahitler, sütun parçaları ve mezar taşları günümüzde İscehisar ilçesi sokaklarında sergilenmektedir (Şekil 2).

Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermeri, MÖ 1. ile MS 6. yüzyıl arasında büyük miktarlarda çıkarılmış, sütun, arşitrav ve döşeme-kaplama malzemesi gibi mimari elemanlar, dönemin Akdeniz şehirlerine geniş çapta ihraç edilmiştir. Roma döneminde Docimium ocağında üretilen bu eserler Yunanistan, Suriye ve İtalya gibi ülkelerdeki birçok şehirde çeşitli anıtsal yapılarda görülmektedir [10]. Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermeri sadece Roma'ya, Ostia'ya ve Kuzey Afrika kıyılarındaki büyük şehirlere değil, aynı zamanda İspanya'nın güneyine ve güney İngiltere'ye de getirilmiştir [11]. Antik dünyada, çok uzaklarda bulunan taş ocaklarından üretilen mermerlerin nakliyesi gemi taşımacılığına dayanıyordu. Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermerinin Anadolu'dan tüm Akdeniz bölgesine ihracatını belgeleyen en önemli kanıt, çeşitli kıyılarda tespit edilen taş kargoları ile birlikte batmış olan gemilerdir. Bu batıkların en önemlilerinden birisi Crotona (İtalya) yakınlarındaki Capo Colonna'nın 2 km güneyinde Punta Scifo'da tespit edilmiştir [12]. Geminin kendisi yaklaşık 30 m uzunluğunda, 10 m genişliğinde, iki sıra gömme ve zivana eklemi ile kuvvetli bir gövdeye sahipti ve yaklaşık 200 ton, ağırlıklı olarak pavonazzetto ve Proconnesos (Marmara adası) beyaz mermerden yapılmış eserler taşıyordu [13]. Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermerleri, muhtemelen Synnada (modern Şuhut), Apameia (modern Dinar) ve Laodiceia (Denizli) yolu ile karadan ve Maeander'den (Menderes nehri) aşağıya Tralles'e ve sonra Efes limanına nehir yoluyla getirilmiştir (Şekil 3) [9].



Şekil 1. İscehisar'da (antik Docimium) modern taş ocağının (a), antik ocağın(b) ve antik taş kesme izlerinin (c, d e) görünümü. (The view of the modern quarry (a), ancient quarry (b) and ancient stone cut marks (c, d, e) in İscehisar marble quarry)



Şekil 2. İscehisar sokaklarındaki antik taş ocağından çıkarılan, çoğunlukla Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermerinden yapılmış antik blok ve sütunların görünümü. (View of ancient blocks and columns, mostly of Afyon violet (Pavonazzetto) marble, extracted from the ancient quarry on the İscehisar streets)



Şekil 3. Mermerlerin Docimium (İscehisar) ocaklarından Efes limanına ulaşım yolu (Åhlfeldt, [14]' den düzenlenmiştir). (The transportation road from the quarries of Docimium (İscehisar) to the port of Ephesus)

Literatürde, Docimium (İscehisar-Afyonkarahisar) mermer ocağı ile ilgili ilk bilgiler, Strabo (M.Ö. 63-MS 24) tarafından bildirilmiştir. Strabo (XII.8.14), Docimium mermerlerindeki renk çeşitliliğinin yanında mermerin Roma'ya ihraç edildiğine dikkat çekmiştir. Strabo ayrıca, ilk başta Docimaeen ocağının sadece küçük boyutlu mermer ürettiğini açıklıyor. Sonrasında, nadir renk çeşitliliği nedeniyle, hem monolitik sütunların

(bu kadar ağır yüklerin denize taşınmasının zor olmasına rağmen) hem de boyutlarına dikkat çeken ve Roma'ya taşınan sütun ve plakaların olduğunu bildirmiştir [15, 16].

Çok sayıda araştırmacı, Docimium (İscehisar-Afyonkarahisar) mermer ocağı ile ilgili çalışmalar yapmıştır [17, 18]. Bu çalışmalardan Röder [6], bölgenin jeolojik yapısını ve ocakların özelliklerini, Waelkens [19], mermer ocağında yarım kalmış lahitler ve mezar taşları üzerindeki yazıtları, Fant [20], Docimium ocağında terkedilmiş bloklarda bulunan yazıtları incelemiştir. Menekşe mermerinin en erken kullanımının Augustus Forumundaki Mars Ultor Tapınağı'nın zemin kaplamasında gözlendiğini belirtmiştir. Ayrıca Julia Bazilikası, Domus Flavia ve Nero'nun Subico'daki Villasının yer döşemesi menekşe mermerleri olduğunu, en dikkat çekici ve görkemli menekşe örneklerinin Panteon'daki iki devasa sütun olduğunu ifade etmiştir. Dodge [11], MS 2. yüzyılda, pavonazzetto ocaklarının gelişmeye devam ettiğini ve bu dönemde mermerlerin, Roma dışında ve yakın çevresi dışında yaygın olarak kullanılmamasına rağmen, Anadolu'nun batı kıyısındaki Efes, Pergamum, Sardis ve Smyrna'da kullanıldığını, Quenemoen, [21], menekşe mermerlerinin Palatine Tepesi'ndeki Apollo Tapınağı'nı çevreleyen Danaidlerin Portikosu'nun kaidelerinde ve sütunlarında kullanıldığını rapor etmiştir.

Son yıllarda İscehisar ocakları ile ilgili araştırmalar giderek artmaktadır. Lazzarini vd. [22], Copia Roma Tiyatrosunun beyaz ve renkli mermerleri konulu çalışmada, Afyon Menekşe mermerlerinin en bol kullanılan taşlardan biri olduğunu belirlemişlerdir. Trimble [23], Punta Scifo (İtalya) antik kentinde Frigya beyaz mermerleri ile Frigya menekşe mermerlerin birlikte kullanıldığını belirtmiştir. Columbu vd. [24], Hadrian'ın Villasındaki Heliocaminus Hamamında (Tivoli, İtalya) oymalarda kullanılan mermerlerin Dokimeon bölgesinden geldiğini belirtmişlerdir. Attanasio vd. [25], Uffizi (Florence, Italy) galerisinde sergilenen beş ünlü antik mermer heykelin (Venere Medici, Apollo Medici, Satiro danzante, Arrotino ve Lottatori) kökenini izotopik, petrografik ve EPR verileri ile incelemişler ve Arrotino heykelinin, Docimium (İscehisar) mermerinden yapıldığını belirlemişlerdir. Barker [26], araştırmasında, MS 79'dan önceki dönemde Pompeii ve Herculaneum'da Pavonazzetto, giallo antico, africano gibi denenmiş ve test edilmiş mermerlerin kullanıldığı sonucuna varmıştır. Bonetto vd. [27], Gortyna (Girit) Pythion Tiyatro binasında yapılan kazılarda Yunanistan ve Kuzey-batı Anadolu kökenli başta Pavonazzetto olmak üzere çok sayıda mermerin zemin ve duvar dekorasyonunda kullanıldığını açıklamışlardır. Bruno [28], Docimium (İscehisar)'da buluna Pavonazzetto mermer ocağının Augustan döneminden beri yoğun bir şekilde işletildiğini, dönemin en ünlü mermeri olduğunu, ama günümüzde korunmadığını, son yıllarda yüzlerce taş eserin ocaklardan kurtarılarak caddelerde sergilendiğini belirtmişlerdir.

Bruno vd. [29], Tiberius (Sperlonga-İtalya) villasında bulunan bir grup heykelin kökenini incelemişler ve bazılarının Pavonazetto mermerinden yapıldığını izotop anali tekniği ile belirlemişlerdir. Boehm vd. [30], Ashkelon (İsrail) Bazilikasında birçok sütunun Pavonazetto mermeri kullanılarak yapıldığını belirtmişlerdir. Al-Bashaireh ve Bedal [31], beyaz ve renkli mermerlerin Ürdün'deki Petra bahçe ve havuz kompleksi kanıtları ile ilgili çalışmalarında yapılan karbon ve oksijen izotop testleri sonucunda 15 örneğin sadece birinin Dokimeon mermeri olabileceği sonucuna varmışlardır. Berk [32], Antik dünyanın en iyi renkli mermerlerinden biri olarak tanımlanan "Pavonazetto" adlı Frigya mermerinin kullanımını, Roma'ya taşınmasını araştırmış ve Roma'daki birçok antik yapıda Frigya mermerlerinin kullanıldığını belirtmiştir. Edmund [33], Konstantinopolis, Perge, Hierapolis, Troia, Antakya, Efes, Smyrna, Side vb. Anadolu kentlerinde Docimaeon mermeri içeren mimari anıtlar ve binalar bulunduğunu, Efes'te hem Artemis Tapınağı'na bitişik Celsus Kütüphanesi'nin sütunları hem de Vedius Hamamı ve Port Hamamı'nın duvar kaplamalarının Pavonazetto mermerinden yapıldığını bildirmiştir. Taelman vd. [34], Urbino (Marche-Italy) Roma tiyatrosunda çeşitli boyutlarda sütunların ve kaplama olarak kullanılan mermerlerin yaklaşık %7'sinin pavonazetto mermerinden yapıldığını çeşitli analiz teknikleri ile belirlemişlerdir. Fioretti vd. [35], St. Nicola Bazilikasında (Bari-Italy) stilistik özgünlük ve işçilik açısından çok önemli olan mozaiklerde kullanılan malzemeler arasında Marmor Phrygium (Pavonazetto) mermerinin de bulunduğunu ifade etmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı, Afyonkarahisar'a bağlı İncehisar ilçesinde çok eski çağlardan günümüze kadar üretimi devam eden Afyon Menekşe (Pavonazetto) mermeri ve bu mermerin antik çağlarda kullanıldığı bölgeler ve kullanım alanları yanı sıra ayrışma özelliklerinin belirlenmesi bu çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır. Karakterizasyon amacıyla Afyon Menekşe (Pavonazetto) mermerinin kimyasal, mineralojik-petrografik, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Antik dönemlerden beri kullanılan Afyon Menekşe (Pavonazetto) mermerinin duraylılığını belirlemek amacıyla da tuz kristalleşmesi ve donma-çözülme deneyleri laboratuvar ortamında yürütülmüştür.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Deneysel çalışmalarda kullanılan Afyon Menekşe mermerinin de çıkarıldığı İncehisar mermer ocakları Afyonkarahisar'ın kuzey doğusunda, Afyonkarahisar'a 25 km uzaklıkta ve Ankara karayolu yolunda, İncehisar ilçesi civarında yer almaktadır (Şekil 4). İncehisar mermer yatakları, İncehisar'ın 1 km-güneydoğusundan başlayıp, iki bölüm olarak Kuzeybatı-Güneydoğu istikametinde uzanmaktadır. İlk bölüm 500x1300 m² alana sahiptir. Bacakale çevresindeki ikinci bölüm ise

1000x4500 m² alana sahiptir. Mermerin kalınlığı Bacakale bölümünde 260 m'ye ulaşmaktadır [36]. İncehisar mermerleri, yapısı ve renklerine göre ticari olarak Afyon Beyaz, Afyon Şeker, Afyon Bal, Afyon Menekşe, Afyon Gri ve Afyon Kaplanpostu olarak adlandırılmıştır. Her ne kadar mor damarlı Afyon Menekşe mermerleri renkli alanlara sahip olsalar da beyaz mermerlerle aynı dokusal özelliklere sahiptirler [37].

2.2. Yöntem (Method)

Afyon Menekşe mermerlerinin tuz kristalleşmesi ve donma-çözülme özelliklerini belirlemeden önce malzeme karakterizasyonu yapmak amacıyla bir dizi kimyasal, mineralojik, petrografik ve fiziko-mekanik test ve analizler uygulanmıştır. Kimyasal analiz, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Doğaltaş Analiz Laboratuvarında Rigaku/ZSX Primus II marka XRF cihazında yapılmıştır. Petrografik incelemeler, ince kesitler üzerinde Leica DM 2500P model polarizem mikroskopta, XRD analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarlarında, Bakır (Cu) X ışını tüpü kullanılarak Shimadzu marka XRD-6000 model cihaz ile ve SEM incelemeleri için örnekler karbonla kaplanmış ve Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan LEO 1430 VP model SEM cihazı incelemeler yapılarak resimleri çekilmiştir. Fiziko-mekanik özellikleri belirlemek amacıyla yoğunluk, su emme, gözeneklilik, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleri TS EN standartlarına göre yapılmıştır (Çizelge 1). Fiziko-mekanik özellikleri belirlemek amacıyla yapılan her bir deney için 6'şar adet 50x50x50 mm boyutlarında kübik Afyon Menekşe mermer örnekleri kullanılmıştır. Mermerlerin ultrases geçiş hızı ölçümleri Proceq Pundit Lab marka ultrases test cihazı (P-dalgası-54 kHz) ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Fiziko mekanik ve yaşlandırma testlerinde kullanılan ilgili standartlar. (Related standards for physico-mechanical and ageing tests)

Testler	İlgili standart
Yoğunluk (kg/m ³)	TS EN 1936 [38]
Ağırlıkça su emme (%)	TS EN 13755 [39]
Gözeneklilik (%)	TS EN 1936 [38]
Ultrasonik dalga hızı (km/s)	TS EN 14579 [40]
Kılcal su emme	TS EN 1925 [41]
Aşınma Direnci (mm)	TS EN 14157 [42]
Basınç dayanımı (MPa)	TS EN 1926 [43]
Eğilme dayanımı (MPa)	TS EN 12372 [44]
Tuz kristalleşme direnci (%)	TS EN 12370 [45]
Donma-çözülme Deneyi (%)	TS EN 12371 [46]

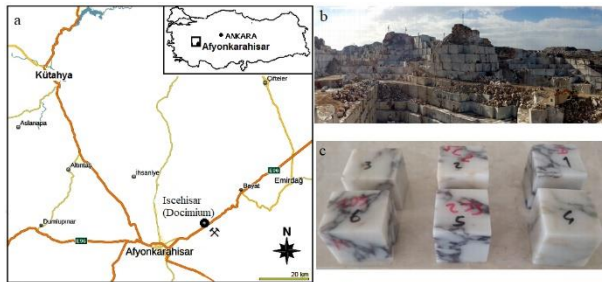
2.2.1. Tuz kristalleşmesine direncin tayini deneyleri (Experiments of resistance to salt crystallization)

Afyon Menekşe mermer örneklerinin tuz kristalleşmesine direncin tayini deneyleri TS EN 12370

[45] standardına göre yapılmış olup deney prosedürü Şekil 5’de verilmiştir. Deneyler, %14 lük sodyum sülfat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) çözeltisi ile kenar uzunlukları 50 ± 2 mm olan 6 adet küp örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Örnekler, birbirleri arasında en az 10 mm ve kapla aralarında en az 20 mm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Örnekler, $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ da 2 saat tuzlu çözelti içerisinde bırakılmıştır. Daha sonra örnekler çözeltiden alınmış ve etüvde 16 saat süreyle $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ’de kurutulmuştur ve yeniden sodyum sülfat çözeltisine daldırılmadan önce (2.0 ± 0.5) saat oda sıcaklığına soğutulmuştur. Bu işlemler dizisi 1 döngü olarak kabul edilerek, örneğinin dağılma parçalanma gibi durumları hariç, 15 kez tekrar edilmiştir. Deneyler sonunda ağırlık kayıpları Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır. Afyon Menekşe mermer örneklerinde tuz kristalleşmesi sonrası ayrışma özellikleri ağırlık kaybı, ultrasonik hız ölçümleri ve tek eksenli basınç dayanımı ile belirlenmiştir.

$$\Delta M = \frac{M_f - M_{d1}}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

Burada; ΔM : Deney öncesi ve sonrası kütlelerdeki bağlı fark (kütle kaybı veya kütle artışı) (%), M_f : On beşinci işlemden sonra etiketle birlikte kuru deney örneğinin kütlesi (g), M_{d1} : Birinci işlemden önce etiketle birlikte kuru deney örneğinin kütlesi (g), M_d : Kuru deney örneğinin kütlesi (g).



Şekil 4. Deneylerde kullanılan örneklerin alındığı Afyon Menekşe mermer ocağının lokasyon haritası (a), ocağın (b) ve fiziko-mekanik testleri için kübik Afyon Menekşe mermeri görünümü (c). (Location of the Afyon Violet marble (a), view of Afyon Violet marble quarry (b), and view of Afyon Violet marble cubic samples for the mechanical and physical tests (c).

2.2.2. Donma-çözülme deneyleri (Experiments of freezing-thawing)

Afyon Menekşe mermer örneklerinin donma-çözülme deneyleri TS EN 12371 [46]’e göre yapılmıştır. Kenar uzunlukları 50 ± 2 mm olan 6 adet örnek $70 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta etüvde sabit kütleyle gelinceye kadar kurutulmuştur. Örnekler daha sonra standarda uygun olarak 48 ± 2 saat süreyle su içerisinde bırakılmış ve suya doygun hale getirilmiştir. Bu işlemden sonra standart donma-çözülme çevrimlerine geçilmiştir. Örnekler -12°C sıcaklıkta derin dondurucuya birbirlerine ve dondurucu cidarına değmeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Her bir çevrim, örneklerin dondurucuda 6 saatlik donma süresi ve bunu takiben suya daldırılmış 6 saatlik çözülme

periyodundan ibarettir. Çevrimler, 50 defa suda 50 defa dondurucuda bekletilerek tamamlanmıştır. Afyon Menekşe mermer örneklerinde donma-çözülme deneyleri sonrası ayrışma özellikleri ağırlık kaybı, ultrasonik hız ölçümleri ve tek eksenli basınç dayanımı ile belirlenmiştir.

$$\Delta M = \frac{M_f - M_o}{M_o} \times 100 \quad (2)$$

Burada; m_o : Deney öncesi kuru örneğin kütlesi (g), m_f : Deney sonrası kuru örneğin kütlesi (g), ΔM : Döngü sonrası örneğin kütleindeki değişim (%).

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Kimyasal Analiz (Chemical Analysis)

Afyon Menekşe mermerinin ana element kimyasal bileşimi Çizelge 2’de verilmiştir. Karbonat mineral oranı yüksek olan mermerler genellikle beyaz renge sahiptir. Bileşimde bulunan elementlerin herhangi bir karışımı mermerlerin rengini önemli ölçüde etkiler. Afyon Menekşe mermerinin büyük ölçüde CaO (%52,8462) bileşimine sahip olduğu görülmektedir. %1,6504 ile Al_2O_3 ve %1,5551 ile SiO_2 diğer önemli bileşiklerdir. Bu bileşiklerin mermerin bileşiminde bulunan ve polarizan mikroskop ve XRD ile belirlenen silikat (muskovit, biyotit, flogopit) mineralleri kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Zaten mermerin sahip olduğu morumsu-kırmızımsı renk kalsit ile birlikte bulunan Fe ve Mn gibi az miktarda kirliliklerin bir sonucudur. Muhtemelen, flogopit ($\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$) gibi

Çizelge 2. Menekşe mermerinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of the Afyon violet marble)

Bileşim	(%)
CaO	52,8462
SiO_2	1,5551
Fe_2O_3	0,8489
MgO	0,1075
Al_2O_3	1,6504
K_2O	0,3802
MnO	0,0782
SrO	0,0166
SO_3	0,0196
P_2O_5	0,0570
Na_2O_3	0,0108
TiO_2	0,0708
Ateş Zaiyatı (LOI)	42,3586

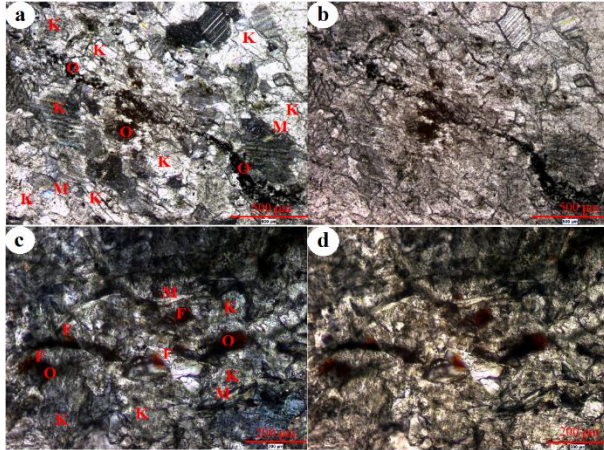
kırmızımsı-kahverengi renkli mineraller de bu renklenmede etkili olmuştur.

3.2. Petrografik ve mineralojik analizler (Petrography and mineralogy)

3.2.1. Polarizan mikroskop analizi (Polarizing optical microscope analysis)

Afyon Menekşe mermerinin petrografik ve mineralojik analizleri ince kesitler yardımıyla yapılmış olup esas

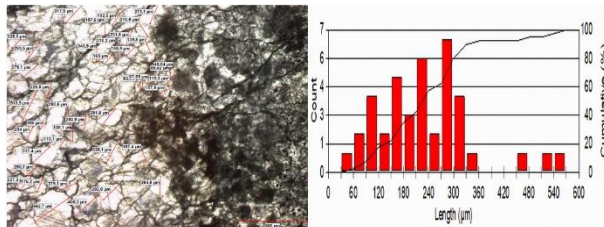
mineralin kalsit olduğu belirlenmiştir. Kalsit mineralleri, çoğunlukla polisentetik ikizlenmeye sahip ksenomorfik kristallerle granoblastik bir doku sunar. Kalsitin yanı sıra menekşe mermere rengini veren opak ve flogopit mineralleri de belirlenmiştir. İnce kesitlerde flogopit mineralleri mikro tanecikler ve kırmızımsı kahverengi renkte gözlenmiştir (Şekil 5). Bunların dışında mika minerali olarak da muskovit az miktarda bulunmaktadır.



Şekil 5. Afyon Menekşe mermerinin polarizan mikroskop görüntüleri, çift nikol, (a, c), tek nikol, (b, d). K: kalsit, F: flogopit, M: muskovit, O: opak mineral. (Thin section photomicrographs of Afyon Violet marble, under crossed polarized light (a, c), under plane-polarized light (b, d). K: calcite, F: phlogopite, M: muscovite, and O: opaque minerals).

3.2.2. Afyon Menekşe mermerinin tane boyutu (Grain size of Afyon violet marble)

Petrografik incelemeleri için hazırlanan ince kesitlerden, Leica DM 2500P model polarizen mikroskop ile 40 adet kalsit mineralinin tane boyutu ölçülerek elde edilen grafik Şekil 6'de verilmiştir. Afyon Menekşe mermerinde en küçük tane boyutu 48.0 µm, en büyük tane boyutu 562,7 µm ve ortalama tane boyutu da 232,5 µm olarak ölçülmüştür. Afyon Menekşe mermerini oluşturan kalsit tanelerinin 150-300 µm aralığında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bu verilere göre Afyon Menekşe mermeri ince kristalli mermer olarak tanımlanabilir.

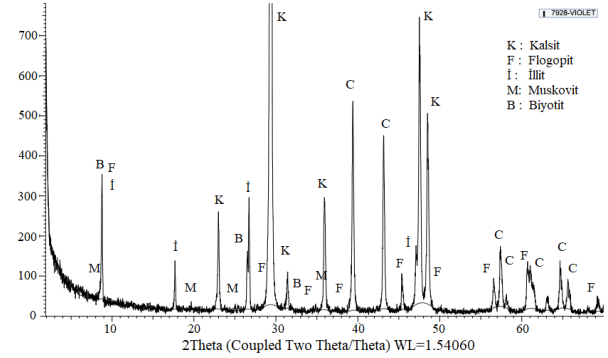


Şekil 6. Afyon Menekşe mermerinin tane boyut dağılımının ölçüldüğü ince kesit fotosu ve tane boyut grafiği. (Thin section photo and grain size graph of Afyon Violet marble).

3.2.3. XRD analizi (X-ray diffraction analysis)

Afyon Menekşe mermerinin mineral bileşimini belirlemek için XRD yöntemi kullanılmıştır. XRD

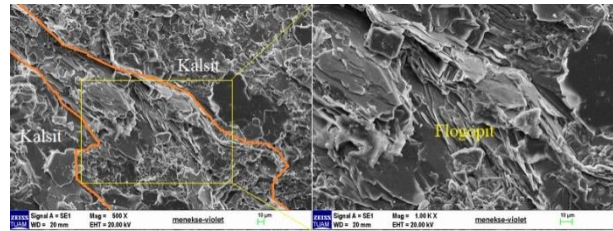
sonuçları, örneklerdeki esas mineralin karbonat minerallerinden kalsit olduğunu, ancak flogopit, muskovit ve illit gibi silikat minerallerin de bulunduğunu göstermiştir (Şekil 7). CaO dışında kimyasal bileşimde bulunan Al_2O_3 , SiO_2 ve Fe_2O_3 bileşenlerinin az oranda bulunmasına rağmen renk verme açısından önemlidir çünkü bunlar silikat minerallerinin varlığı ile ilişkilidir.



Şekil 7. Afyon Menekşe mermerinin XRD analizi. (XRD analysis of Afyon Violet Marble).

3.2.4. SEM analizi (SEM analysis)

Afyon Menekşe mermer örneklerinin SEM ile incelenmesi, bazı mika minerallerinin belirlenmesini sağlamıştır. Mineralojik olarak Afyon Menekşe mermeri, saf kalsitten meydana gelmekle birlikte aksesuar minerali olarak flogopit ($KMg_3(Si_3Al)O_{10}(F,OH)_2$) ve diğer mika mineralleri kalsit taneleri arasında dağılmış halde bulunur. Diğer aksesuar mineralleri muskovit ve kil minerali olarak illittir. Tanecikler arasında dağılmış olan bir miktar flogopit mineralinin oryantasyonuyla yeniden kristalleşme ve dokusal bantlanma gösterirler (Şekil 8). Mika mineralleri çoğunlukla kayaya oryantasyonlu bir doku veren uzun şekilli kümeler şeklinde oluşur.



Şekil 8. Afyon Menekşe mermerindeki flogopit mineral gruplarının SEM görüntüleri. (SEM images of phlogopite mineral assemblages in Afyon Violet marble).

3.4. Fiziko-mekanik Özellikleri (Physical and mechanical properties)

Afyon Menekşe mermerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin ilgili değerleri Çizelge 3'de gösterilmektedir. Afyon Menekşe mermerin yoğunluğu ortalama 2710 kg/m^3 , açık gözeneklilik %0,34, toplam gözeneklilik %2,67 ve su emme %0,10 olarak bulunmuştur.

Çizelge 3. Afyon Menekşe mermerinin bazı fiziko-mekanik özellikleri (Her bir deney için 6 örnek kullanılmıştır). (Some physical and mechanical properties of Afyon Violet marble (6 samples were used for each experiment))

Deneyleler	min	max	ort	Standart sapma
Yoğunluk (kg/m ³)	2704	2717	2710	5,31
Ağırlıkça su emme (%)	0,06	0,12	0,10	0,02
Açık gözeneklilik (%)	0,19	0,83	0,34	0,28
Toplam gözeneklilik (%)	2,66	2,68	2,67	0,01
Ultras ses dalga hızı (km/s)	5,376	6,172	5,851	0,29
Kılcal su emme (kg/m ²)	-	-	0,081	-
Aşınma direnci (mm)	18,65	19,44	19,17	0,28
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	56,00	130,00	91,00	23,00
Eğilme dayanımı (MPa)	15,10	23,00	18,40	3,00

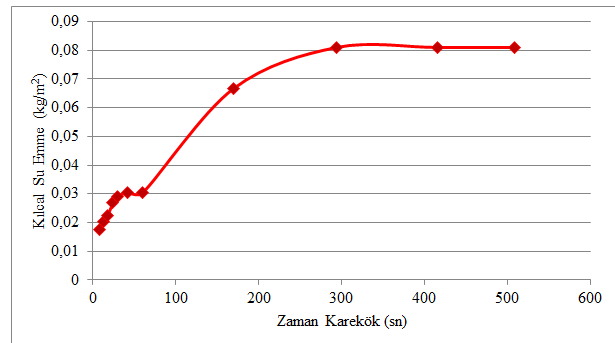
Doğal yapı taşlarının durabilitesini etkileyen en önemli fiziksel özellikler porozite ve buna bağlı olan su emme miktarıdır. Genel olarak gözenek miktarı çok olan kayaların diğerlerine göre daha fazla bozuşma eğiliminde olduğu bilinmektedir. Bu eylem daha çok su içeriğine bağlı olarak donma-çözülme ve tuz kristalleşmesi olaylarının sıklıkla yaşandığı yörelerde ortaya çıkmaktadır. Doğal taşlar tarafından suyun emilmesini, en iyi değerlendirme yöntemlerinden birisi olan kılcal su emme miktarı (4320 dk) Afyon Menekşe mermeri için 0,081 kg/m² olarak ölçülmüştür (Şekil 9). Gerek atmosfer basıncında su emme miktarının, %1'in altında olması, gerekse kılcal su emme miktarının düşük olması Afyon Menekşe mermerinin su emmeye bağlı olan ayrışma miktarının sınırlı olacağını göstermektedir. Bu amaçla yapılacak yaşlandırma deneyleri ile Afyon Menekşe mermerinin durabilitesi irdelenecektir.

3.5. Yaşlandırma Deneyleri (Ageing tests)

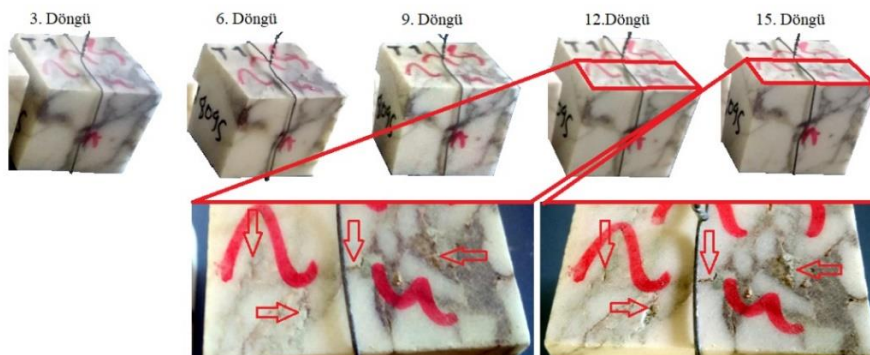
3.5.1. Tuz kristalleşmesine direncin tayini deneyleri (Experiments of resistance to salt crystallization)

TS EN 12370 [45]'e göre yapılan tuz kristalleşmesine direncin tayini deneyinde, 5x5x5 cm küp şeklindeki Afyon Menekşe mermeri örneklerinin 3., 6., 9., 12. ve 15. döngüler sonrasındaki görünüşleri Şekil 10'da verilmiştir. Örneklerin deney sonrasında fiziksel bütünlüğünün bozulmadığı gözlenmiştir. Açık

gözenekliliği %0,34 ve su emmesi %0,1 olan mermer örneklerinin tuz kristalleşme testinde 12. döngüden itibaren çatlak oluşumları gelişmeye başlamış 15. döngü sonrası bu çatlakların daha da açıldığı belirlenmiştir. Oluşan çatlaklara mermerin breşik yapısı etkili olmuştur. Breşik yapıyı oluşturan ve mermer adı veren menekşe renkli çatlak dolgularının yer yer açılmaya başladığı ve birkaç mm boyutlu çukurluklar oluştuğu tespit edilmiştir. Bu renkli kısımlarda yer alan illit gibi kil mineralleri ve SEM analizinde de varlığı ortaya konulan flogopit ve mika minerallerinin varlığı bu ayrışmada büyük bir rol oynamıştır.



Şekil 9. Afyon Menekşe mermerinin kılcal su emme grafiği. (Capillary water absorption graph of Afyon Violet marble).

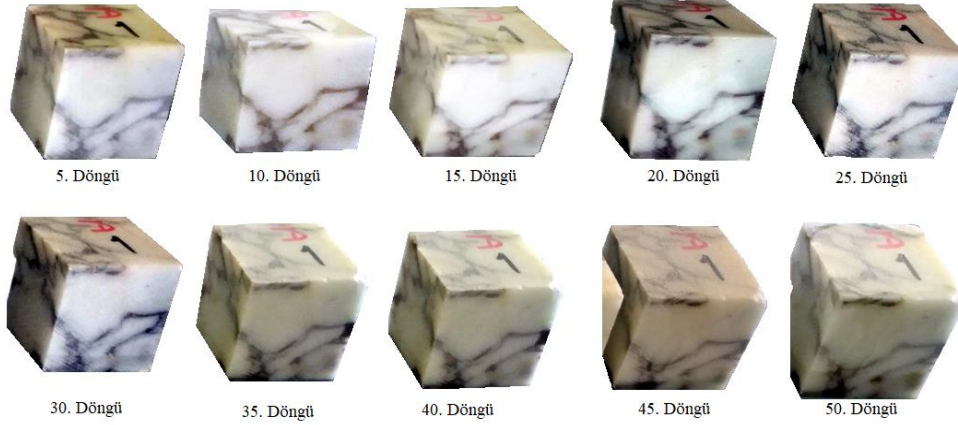


Şekil 10. Tuz kristalleşmesine direncin tayini deneylerinde Afyon Menekşe mermer örneklerinin döngülere göre görünümü. (The view of Afyon Violet marble samples according to cycles in resistance to salt crystallization tests).

3.5.2. Donma-çözülme deneyleri (Experiments of freezing-thawing)

Doğal yapıtaşların mekanik özelliklerini azaltarak dayanıklılıklarını azaltabilecek en güçlü ayrışma faktörlerinden birisi donma-çözülme olaylarıdır. 5x5x5 cm küp şeklindeki Afyon Menekşe mermeri örneklerine TS EN 12371 [46] standartlarına göre 50 döngü donma-çözülme deneyi uygulanmıştır. Her 5 döngüde bir fotoğraf çekilen örneklerin görünümü Şekil 11’de verilmiştir. Donma-çözülme döngülerinin deney

örneklerinde fiziksel bütünlük korunmuş ve kayda değer bir ayrışma meydana gelmemiştir. Ancak bazı örneklerin kenar ve köşelerinde küçük kırıntılar şeklinde partikül kayıpları oluşmuştur. Bu durum örneklerin durabilitesini etkilemeyecek boyutlarda olduğu ve bütünlüğünü bozmayan köşelerin ve kenarların çok az yuvarlaklaşması şeklinde çok küçük hasar olarak tanımlanmıştır.



Şekil 11. Afyon Menekşe mermer örneklerinin (1 nolu örnek) donma-çözülme döngülerine göre görünümü. (View of Afyon Violet marble samples (1 number) according to freeze-thaw cycles).

3.6. Yaşlandırma Deneyleri Sonrası Meydana Gelen Değişikliklerin İncelenmesi (Investigation of the changes after the ageing test)

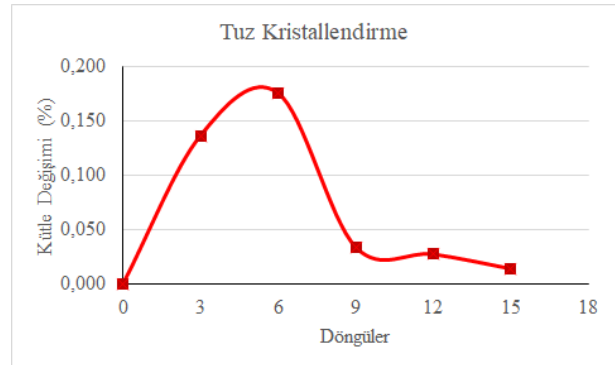
3.6.1. Tuz kristalleşmesine direncin tayini deneyi sonrası meydana gelen değişikliklerin incelenmesi (Investigation of the changes after the salt crystallization test)

Tuz kristallenmesine direncin tayini deneyinde, 15 döngü sonunda Afyon Menekşe mermer örneklerinde meydana gelen değişiklikleri incelemek ve dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla kütle ağırlığı değişimi, ultra ses geçiş hızı ve tek eksenli basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

3.6.1.1. Kütle değişimi (Change mass)

Toplam 15 döngü olarak gerçekleştirilen tuz kristallenmesine direncin tayini deneyinde, her 3 döngü sonunda numunelerin Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanan kütle ağırlığı değişimleri Şekil 12’de verilmiştir. 3. ve 6. döngüde %0,14 ve %0,18 olarak ölçülen kütle artışı 9., 12. ve 15. döngülerde sırasıyla %0,034, %0,028 ve %0,014 olarak gerçekleşmiştir. Deney sırasında ölçülen kütle artışının sebebi, örneklerin gözeneklerinin tuzlu su çözeltisi ile doymun hale gelmesi ve etüvde kurutma sırasında buharlaşma nedeniyle gözeneklerde tuzların kristallenmesi olarak açıklanabilir. İlerleyen döngülerde, gözeneklerde yeniden tuz kristalleri birikmekte ve giderek artan miktarlarda gözeneklere uygulanan basınç

nedeniyle de mikro çatlaklar gelişmektedir. Bu mikro çatlaklar ilerleyen döngülerde daha da genişleyerek deneylerde kullanılan örneklerde tane kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle de başlangıçta artan kütle miktarı döngülerin artışına paralel olarak azalmaktadır.

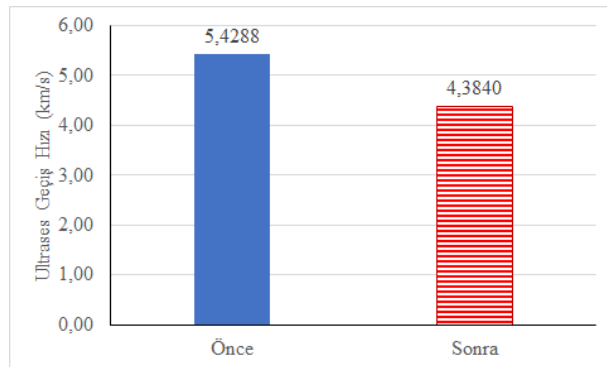


Şekil 12. Afyon Menekşe mermerinin tuz kristalleşmesine direncin tayini deneyi sonrası döngülere göre kütle değişim grafiği. (Mass change graph according to cycles after resistance to salt crystallization tests of Afyon Violet marble).

3.6.1.2. Ultrasonik dalga hızı değişimi (Ultrasound velocity variation due to salt crystallization)

Ultrasonik dalga hızı ilerlemesi taşların bileşiminin yanı sıra gözenek ve çatlak gibi yapısal özelliklerine bağlıdır. Özellikle taşların bünyesinde bulunan çatlaklar bu hızı

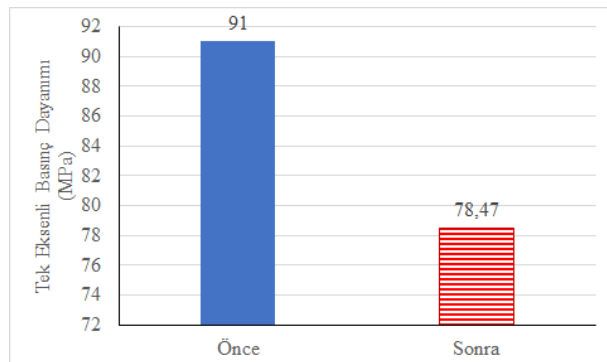
önemli ölçüde etkilemektedir. Tuz kristalleşmesine bağlı olarak, mevcut olan çatlaklar daha da genişleyebileceği gibi yeni çatlaklar da oluşabilmektedir. Afyon Menekşe mermerinin tuz kristalleşmesine direncin tayini deneyi sonrası ultrasonik dalga hızı değişimi grafiği Şekil 13'de verilmiştir. Ultrasonik dalga hızı geçişinin deney sonrasında %23,83 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu durum Afyon Menekşe mermerinin fiziksel görünümünün bozulmamasına rağmen mikro çatlak oluşumunun başladığını göstermektedir.



Şekil 13. Afyon Menekşe mermerinin tuz kristalleşmesine direncin tayini deneyi sonrası ultrasonik dalga hızı değişimi grafiği. (Ultrasound velocity change graph after resistance to salt crystallization tests of Afyon Violet marble).

3.6.1.3. Tek eksenli basınç dayanımı değişimi (Uniaxial compression strength (UCS) variation due to salt crystallization)

Tuz kristallenmesine maruz kalan Afyon Menekşe mermeri örneklerinin dayanımlarındaki değişimleri belirlemek amacıyla tek eksenli basınç dayanımı deneyleri yapılarak deney sonucu elde edilen veriler incelenmiştir. Tuz kristallenmesi öncesi ve sonrası tek eksenli basınç dayanımı değerleri Şekil. 14'de verilmiştir. Bu verilere göre deney sonrasında tek eksenli basınç dayanımı %15,97 oranında azalmıştır. Bu durum ultrasonik dalga hızı ilerlemesi değerlerindeki azalmadan dolayı olduğu düşünülen mikro çatlaklar ile ilişkilidir. Gelişen mikro çatlakların mermerin breşik yapısından kaynaklandığı ve özellikle renkli kısımlarda yer alan mika grubu minerallere bağlı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 14. Afyon Menekşe mermerinin tuz kristalleşmesine direncin tayini sonrası tek eksenli basınç değişimi grafiği. (Uniaxial compressive strength change

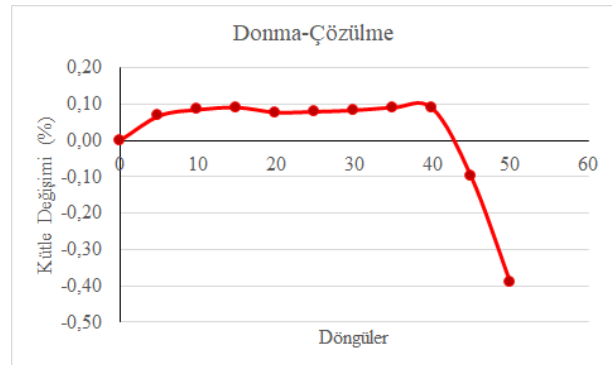
graph after determination of resistance to salt crystallization tests of Afyon Violet marble).

3.6.2. Donma-çözülme deneyleri sonrası meydana gelen değişikliklerin incelenmesi (Investigation of the changes after the freezing-thawing test)

Donma-çözülme deneyinde, 50 döngü sonunda Afyon Menekşe mermer örneklerinde meydana gelen değişiklikleri incelemek ve dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla kütle ağırlığı değişimi, ultra ses geçiş hızı ve tek eksenli basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

3.6.2.1. Kütle değişimi (Change mass)

Donma-çözülme deneyinde, ilk 40 döngüde %0,07-0,09 olan kütle artış oranı, 45. döngüde %0,10 azalma, 50. döngü ve deney sonunda ise %0,39 kütle azalması şeklinde gerçekleşmiştir (Şekil 15). Bu azalma, Afyon Menekşe mermer örneklerin durabilitesini etkilemeyecek ölçekte olduğu değerlendirilmektedir. Nitekim görsel olarak da deney sonrasında örneklerde oluşan hasar, bütünlüğü bozmayacak şekilde köşelerin ve kenarların çok az yuvarlaklaşması olarak tanımlanmıştır.



Şekil 15. Afyon Menekşe mermerinin donma-çözülme deneyi sonrası döngülere göre kütle değişim grafiği. (Mass change graph according to cycles after resistance to freezing-thawing tests of Afyon Violet marble).

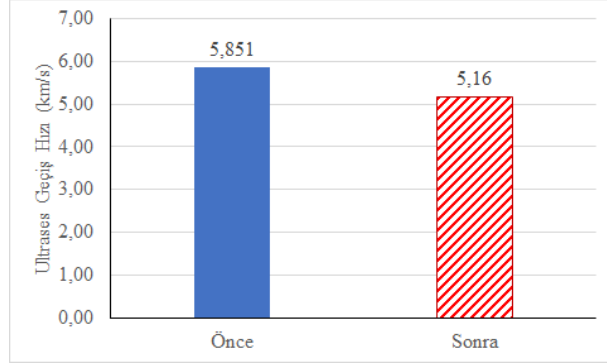
3.6.2.2. Ultrasonik dalga hızı değişimi (Ultrasound velocity variation due to freezing-thawing tests)

Afyon Menekşe mermer örneklerinde deney öncesi 5,851 km/s olan ultrases geçiş hızı değeri, don tesirlerine dayanım deneyi sonrasında 5,160 km/s'ye düşmüştür. Donma-çözülme döngüleri sonucunda mermer örneklerinde makroskobik olarak önemli fiziksel değişiklikler gözlenmemiştir. Ultrases geçiş hızında %13,3 olarak tespit edilen azalma oranı, örneklerin içerisinde gelişen mikro çatlaklara bağlı olmalıdır. Ancak gelişen bu mikro çatlaklar, mermer örneklerinin çok fazla ayrışmasına yol açmadığını göstermektedir.

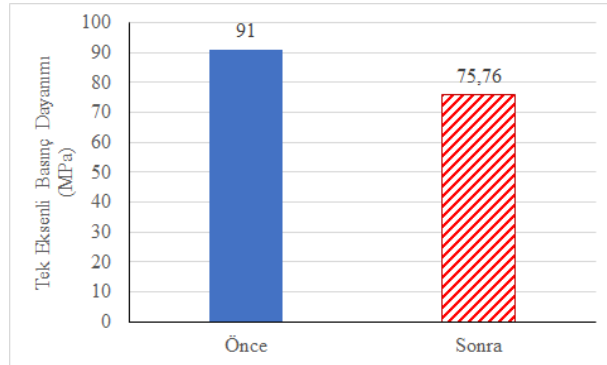
3.6.2.3. Tek eksenli basınç dayanımı değişimi (Uniaxial compression strength (UCS) variation due to freezing-thawing tests)

Afyon Menekşe mermeri örneklerinde don deneyi öncesi ortalama 91 MPa olan tek eksenli basınç dayanımı değeri don deneyi sonrasında 75,76 MPa'a düşmüştür. Tek

eksenli basınç dayanımı kaybı %20,11 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum mermer örneklerinin renkli kısımları oluşturan breşik yapısında yer alan flogopit ve muskovit gibi mika grubu minerallerin varlığından kaynaklanmaktadır. Mermerin büyük çoğunluğunu oluşturan kalsit mineraline göre daha kolay ayrılan bu mineral gruplarının yoğun olarak bulunduğu alanlarda oluşan deformasyonlar, dayanımda azalmaya yol açmıştır.



Şekil 16. Afyon Menekşe mermerinin donma-çözülme deneyi sonrası ultrasonik dalga hızı değişimi grafiği. (Ultrasound velocity change graph after resistance to freezing-thawing tests of Afyon Violet marble).

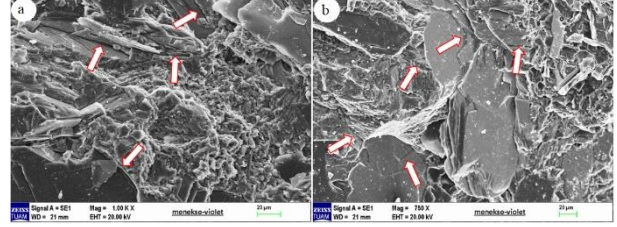


Şekil 17. Afyon Menekşe mermerinin donma-çözülme deneyi sonrası tek eksenli basınç değişimi grafiği. (Uniaxial compressive strength change graph after determination of resistance to freezing-thawing tests of Afyon Violet marble).

3.7. Yaşlandırma Deneyleri Sonrası Meydana Gelen Değişikliklerin SEM ile İncelenmesi (Investigation of the Changes After the Ageing Test by SEM)

Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermer örneklerinde, laboratuvar ortamında yapılan yaşlandırma deneyleri (tuz kristalleşme ve donma-çözülme) sonrasında meydana gelen değişiklikleri incelemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) çalışması yapılmıştır. SEM incelemeleri sonucunda elde edilen resimler Şekil 18'de verilmiştir. Tuz kristalleşmesi deneyinde, sodyum sülfat kristallerinin kalsit minerallerinin yüzeyinde ve mika minerallerinin dilinim düzlemleri boyunca olduğu gözlenmiştir. Bu oluşumlara bağlı olarak kalsit

mineralleri tane sınırları ve mika minerallerinde ayrışmalar tespit edilmiştir. Aynı şekilde donma-çözülme deneylerinde de dilinimli mineraller boyunca ayrışmaların yanı sıra kısmen kalsit minerallerinde de mikro çatlak oluşumları belirlenmiştir.



Şekil 18. Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermer örneklerinde tuz kristalleşmesine direncin tayini (a) ve donma-çözülme (b) deneyleri sonrasında meydana gelen ayrışmaların SEM görünümü. (Determination of the resistance to salt crystallization in Afyon Menekşe (Pavonazzetto) marble samples (a) and SEM appearance of the deterioration that occurred after freezing-thawing experiments (b)).

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Çok eski çağlardan günümüze kadar İsehisar (Afyonkarahisar) ocaklarında üretimi devam eden Afyon Menekşe mermerinin, antik çağlarda üretimi, kullanım alanları, teknolojik ve dayanım özelliklerinin belirlenmesi bu çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır. Antik dönemlerde Pavonazzetto adıyla bilinen Afyon Menekşe mermeri numunelerinin bazı fiziksel, mekanik ve ayrışma özelliklerini belirlemek için ilgili standartlara göre deneyler yapılmıştır.

Afyon Menekşe mermerinin kimyasal bileşiminde %52,8462 CaO bulunmaktadır. Afyon Menekşe mermerinin Polarizan mikroskop incelemelerinde polisentetik ikizlenmeye sahip kalsit minerallerinin çoğunluğu oluşturduğu gözlenmiştir. Afyon Menekşe mermeri, granoblastik yapıya sahip ince taneli bir mermerdir, genellikle kalsit minerallerinden oluşmakta olup tane boyutu ortalama 232,5 µm olarak belirlenmiştir. Breşik yapıya sahip mermerin özellikle demir oksitle boyanmış mor renkli damarlarında, XRD analizinde mika (flogopit ve muskovit) ve kil (illit) mineralleri içerdiği belirlenmiştir. Afyon Menekşe mermerinin yoğunluğu ortalama 2710 kg/m³, açık gözeneklilik %0,34, toplam gözeneklilik %2,67 ve su emme %0,10 olarak tespit edilmiştir.

Afyon Menekşe (Pavonazzetto) mermerinin kalıcılığı ve zaman karşı yapısal duraylılığı, laboratuvar ortamında yaşlandırma deneyleri (tuz kristalleşme ve donma-çözülme) yardımıyla değerlendirilmiştir. Tuz kristalleşmesine direncin tayini deneyinde 15 döngü sonunda %0,014 oranında oluşan kütle artışı gözeneklerde biriken tuz kristallerine bağlı iken donma-çözülme deneyinde 50 döngü sonunda sadece %0,39 kütle azalması gerçekleşmiştir. Deneysel çalışmalara göre ayrışmalar, mermerlerin genellikle breşik yapı gösteren mor renkli kısımlarında geliştiği belirlenmiştir. Bu bölgelerde yer alan ve mermerin esas minerali olan

kalsit mineraline göre daha kolay ayrışma özelliği gösteren mika ve illit gibi mineraller tuz kristalleşmesi ve donma-çözülme döngülerine bağlı olarak kısmi ayrışma özelliği göstermiştir. Nitekim tuz kristalleşmesi ve donma-çözülme deneyleri sonrasında ultrasonik dalga hızı ilerlemesi sırasıyla %23,83 ve %13,3, tek eksenli basınç dayanımı değerleri %15,97 ve %20,11 oranında azalma göstermesine rağmen bu ayrışma olayları Afyon Menekşe mermer numunelerinin fiziksel bütünlüğünün bozulmasına yol açmamıştır. Afyon Menekşe mermerlerinin kullanıldığı anıtsal yapılarda ve tarihi eserlerde binlerce yıldır sağlam olarak kalması ve günümüze kadar gelmesi de bu durumu desteklemektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mustafa Yavuz ÇELİK: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Murat SERT: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Mrozek-Wysocka M. "Ancient marbles: Provenance determination by archaeometric study". In *Geoscience in Archaeometry. Methods and Case Studies*; Michalska, D., Szczepaniak, M., Eds.; *Wydawnictwo Naukowe Bogucki: Poznan*, Poland, 99–122, (2014).
- [2] Moropoulou A., Delegou E.T., Apostolopoulou M., Kolaiti A., Papatrechas C., Economou G., Mavrogonatos C. "The white marbles of the Tomb of Christ in Jerusalem: characterization and provenance", *Sustainability*, 11: 2495, (2019).
- [3] Yavuz A.B. "Mermer ocaklarında üretim verimliliğini etkileyen jeolojik parametreler ve bunların tespitinin üretim verimliliği üzerindeki etkileri", *Mermer Madencilğinde Çevresel Yaklaşımlar, Muğla Büyükşehir Belediyesi Kültür Yayınları* – 6, (Ed. Güler, T ve Polat E), 1-22, (2018).
- [4] Lazzarini L. "Archaeometric aspects of white and coloured marbles used in antiquity: the state of the art", *Periodico di Mineralogie*, 73: 113-125, (2004).
- [5] Koch G. "Sarkophage DerRömischen Kaiserzeit", Roma İmparatorluk Dönemi Lahitleri, (in Turkish), Çev. Z. Zühre İlkgelen, *Arkeoloji ve Sanat Yayınları*, İstanbul, (2001).
- [6] Röder J. "Marmor Phrygium; Die Antiken Marmorbrüche von İsechisar in Westanatolien". *JDL* 86: 253–312, (1971).
- [7] Attanasio D., Bruno M., Prochaska W., Yavuz A.B. "Analysis and Discrimination of Phrygian and other Pavonazzetto-like marbles", *Proceedings of the Tenth International Conference of ASMOSIA Association for the Study of Marble & Other Stones in Antiquity Rome*. (2012).
- [8] Long L.E. "Extracting economics from Roman marble quarries". *Economic History Review*, 70(1): 52–78, (2017).
- [9] Hirt A.M. "Imperial Mines and Quarries in the Roman World Organizational Aspects 27 BC–AD 235". (Oxford Classical Monographs). *Oxford University Press*. 14: 551, (2010).
- [10] Herrmann J.J., Tykot R.H. "Some products from the Docimium quarries: craters, tables, capitals, and statues", In Y. Maniatis (ed.), *ASMOSIA VII. Proceedings of the 7th International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity*. Bulletin de Correspondance Hellénique Suppl. 51: 59–75, (2009).
- [11] Dodge H. "Decorative stones for architecture in the Roman empire". *Oxford Journal of Archaeology*, 7(1): 65–80, (1988).
- [12] Rice C. "Shipwreck cargoes in the Western Mediterranean and the organization of Roman maritime trade". *Journal of Roman Archaeology*, 29: 165–192, (2016).
- [13] Bartoli D.G. "Marble transport in the time of the Severans: a new analysis of the Punta Scifo A shipwreck at Croton, Italy", Doctor of Philosophy, *Texas A&M University*, (2008).
- [14] Ahlfeldt J. "Digital Atlas of the Roman Empire". <http://imperium.ahlfeldt.se/places/21261.html>, (2013).
- [15] Jones H.L. "The Geography of Strabo", Volume 5. Book 10-12, English translation by HL Jones. *Heinemann Ltd*. London, (1961).
- [16] Monna D., Pensabene P. "Marmi dell'Asia Minore". Roma: *C.N.R.* (1977).
- [17] Pensabene P. "Marmi pubblici e marmi privati. Note in margine ad un recente volume di Ben Russell". *Archeologia Classica*, 66: 575-594, (2015).
- [18] Antonelli F., Lazzarini L., Cancelliere S., Tesser E. "Study of the deterioration products, gilding, and polychromy of the stones of the Scuola Grande Di San Marco's façade in Venice", *Studies in Conservation*, 61(2): 74-85, (2016).
- [19] Waelkens M. "Docimium die werkstatt der representativen kleinasiatischen Sarkophage. Chronologie und Typologie ihrer Produktion". *Berlin*. (1982).
- [20] Fant J.C. Cavum Antrum Phrygiae. "The organization and operations of the Roman Imperial marble quarries in Phrygia", *Oxford: British Archaeological Reports*, 482, Oxford, 268, (1989).
- [21] Quenemoen C.K. "The Portico of the Danaids: a new reconstruction", *American Journal of Archeology*, 110(2), 229-250, (2006).
- [22] Lazzarini L., Luppino S., Malacrino C.G. "The white and coloured marbles of the Roman Theatre of Copia

- (Cosenza, Italy)". *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*, 71–92, (2010).
- [23] Trimble J. "Women and Visual Replication in Roman Imperial Art and Culture". *Cambridge University Press*, (2011).
- [24] Columbu S., Antonelli F., Lezzerini M., Miriello D., Adembri B., Blanco A. "Provenance of marbles used in the Heliocaminus Baths of Hadrian's Villa (Tivoli, Italy)". *Journal of Archaeological Science*, 49: 332–342, (2014).
- [25] Attanasio D., Boschi C., Bracci S., Cantisani E., Paolucci F. "Provenance studies of the marble of ancient sculptures in the tribune of the uffizi gallery". *Florence. Archaeom.* 57(1): 74–89, (2015).
- [26] Barker S.J. "The marble trade at Pompeii and Herculaneum". *ASMOSIA XI, Association for the Study of Marble & Other Stones In Antiquity XI International Conference*. 57, Split, Croatia, (2015).
- [27] Bonetto J., Bueno M., Mareso N. "Polychrome marbles from the Pythion's theatre in Gortyna (Crete)". *ASMOSIA XI, Association for the Study of Marble & Other Stones In Antiquity XI International Conference*, 70, Split, Croatia, (2015).
- [28] Bruno M. "Unknown quarry inscriptions from the Bacakale quarry at Docimium (Turkey)". *ASMOSIA XI, Association for the Study of Marble & Other Stones In Antiquity XI International Conference*. 76, Split, Croatia, (2015).
- [29] Bruno M. Attanasio D. Prochaska W. "The Docimium marble sculptures of the Grotto of Tiberius at Sperlonga". *American Journal of Archaeology*, 119(3): 375–394, (2015).
- [30] Boehm R., Master D.M., Le Blanc R. The Basilica, Bouleuterion, and Civic Center of Ashkelon. *American Journal of Archaeology*, 120 (2): 271–324, (2016).
- [31] Al-Bashaireh K., Bedal L.A. "Provenance of white and colored marbles from the Petra garden and pool complex, Petra, South Jordan". *Archaeological and Anthropological Sciences*, 9(5): 817–829, (2017).
- [32] Berk, F.M. "Phrygian marble in Rome". *International Journal of Social and Educational Sciences*, 4(8): 194–208. (2017).
- [33] Edmund T. "Performance space, in The Oxford handbook of the Second Sophistic". *Oxford: Oxford University Press*, 181–201, (2017).
- [34] Taelman D., Delpino C., Antonelli F. "Marble decoration of the Roman theatre of Urvinum Mataurense (Urbino, Marche region, Italy): An archaeological and archaeometric multi-method provenance study". *Journal of Cultural Heritage*, 39: 238–250, (2019).
- [35] Fioretti G., Acquafredda P., Calò S., Cinelli M., Germanò G., Laera A., Moccia A. "Study and Conservation of the St. Nicola's Basilica Mosaics (Bari, Italy) by Photogrammetric Survey: Mapping of Polychrome Marbles, Decorative Patterns and Past Restorations", *Studies in Conservation*, DOI: 10.1080/00393630.2019.1614270, (2019).
- [36] Anil M., Kiliç A., Kahraman S., Sandıkçı M., Akyıldız M. "İscehisar (Afyon) mermerlerinin petrografik ve mekanik özellikleri", *K.T.Ü. Jeoloji Müh. Bölümü 30. Yıl Sempozyumu Bildirileri*. 436–447 Trabzon, (1996).
- [37] Çelik M.Y., Sabah E. "Geological and technical characterisation of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution". *Journal of Environmental Management*, 87(1): 106–116, (2008).
- [38] TS EN 1936, "Doğal Taşlar-Deney yöntemleri-Gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık porozite tayini", *TSE*, Ankara, (2010).
- [39] TS EN 13755, "Doğal Taşlar-Deney yöntemleri-Atmosfer basıncında su emme tayini", *TSE*, Ankara, (2014).
- [40] TS EN 14579, "Doğal Taşlar-Deney yöntemleri-Ses hızı ilerlemesinin tayini", *TSE*, Ankara, (2006).
- [41] TS EN 1925, "Doğal Taşlar-Deney metotları- Kılcal etkiye bağlı su emme katsayısının tayini", *TSE*, Ankara, (2000).
- [42] TS EN 14157, "Doğal Taşlar-Aşınma direncinin tayini", *TSE*, Ankara, (2005).
- [43] TS EN 1926, "Doğal Taşlar-Deney yöntemleri-Tek eksenli basınç dayanımı tayini", *TSE*, Ankara, (2013).
- [44] TS EN 12372. "Doğal taşlar-Deney metotları-Yoğun yük altında bükülme dayanımı tayini", *TSE*, Ankara. (2007).
- [45] TS EN 12370, "Doğal Taşlar-Deney metotları-Tuz kristalleşmesine direncin tayini", *TSE*, Ankara, (2001).
- [46] TS EN 12371. "Doğal taşlar-Deney metotları-Dona dayanım tayini", *TSE*, Ankara, (2003)