

# İSTANBUL'DAKİ TARİHİ ANIT VE YAPILARDA KULLANILAN KİREÇTAŞLARININ KİRLENME VE AYRIŞMASINDA ETKİN FAKTÖRLER

## EFFECTIVE FACTORS IN DETERIORATION OF LIMESTONES USED IN HISTORICAL BUILDINGS AND MONUMENTS IN ISTANBUL

Atiye TUĞRUL<sup>1</sup>, İ.Halil ZARİF<sup>1</sup>, Mustafa YILDIRIM<sup>2</sup> ve Okay GÜRPINAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Istanbul Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34850 Avcılar - ISTANBUL

<sup>2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 80750 Yıldız- ISTANBUL

**ÖZ:** İstanbul'daki tarihi anıt ve yapıların çoğunda kullanılmış olan fosilli kireçtaşları zaman içinde kirlenme ve ayrışmaya maruz kalmıştır. Çevreden kaynaklanan su, gaz, rüzgar ve canlılar gibi parametreler, yapıda kullanılmalarından itibaren taşa etki ederler. Bunların etkileri ile etki süreleri, taşın petrografik, mineralojik, kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Kireçtaşlarının bileşimlerinin yanısıra, içerdikleri kavkılarn boyutları, miktarları ve yönelimleri, kirlenme ve ayrışmalarında etkin parametrelerden birini oluşturmaktadır. Farklı özellikteki kireçtaşlarının birarada kullanılması, taşların kesimi, yüzeylerinin işlenme biçimi, traşlanmış olup olmamaları, eserlerde kullanım şekilleri, yapının üst veya temele yakın kesiminde veya farklı cephelerde kullanılmaları ayrışma ve kirlenmelerini değişik oranlarda etkilemiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Kireçtaşı, Kirlenme, Ayrışma, Tarihi anıt ve yapılar

**ABSTRACT:** Shelly limestone is used in many historical monuments and buildings, and it is subjected to environmental factors such as water, gas, wind, and human and animal activity. The effects of environmental factors resulting deterioration and their duration depend on the petrographical, mineralogical, physical and chemical properties of the rock. Chemical composition of the limestone, shell size, its abundance and orientation are also important parameters. The style of cutting, polishing, use style, site in which it was used effected the rate of deterioration.

**Key Words:** Limestone, Deterioration, Historical buildings and monuments

### GİRİŞ

Tarihte Bizans, Roma ve Osmanlı imparatorluklarının başkenti olan İstanbul tarihi anıt ve yapılar bakımından zengin bir şehirdir. Bu ilimizdeki endüstriyelleşmenin hızlı gelişmesi ile orantılı olarak bu alandaki tarihi eserlerde kullanılan taşların bozunması, kırsal kesimdekilere oranla çok daha hızlı gelişmektedir. Bu eserlerdeki taşların kirlenmesi ve ayrışması kültürel zenginliklerin tahrip ol-

masına neden olmaktadır.

Birçok araştırmacının da ifade ettiği gibi binalarda kullanılan taşların ayrışma ve kirlenmesi daha çok hava kirliliği nedeniyle (Attewell ve Taylor, 1990; Gauri, 1990; Kertész, 1990; Dragovich, 1991; Moropoulou vd., 1993; Bell, 1993; Grossi vd., 1994; Esbert vd., 1995; Garcia Pascua vd. 1995). Özellikle karbonatlı kayaçların asitli ortamlara duyarlılıkları diğerlerine oranla daha fazladır

(Dragovich, 1991). Keskinler vd. (1994) tarafından  $\text{CaCO}_3$  içeren taşların hava kirliliğinden önemli derecede etkilendiği, buna karşılık;  $\text{CaCO}_3$  içermeyen taşların jips oluşumu açısından hava kirliliğinden etkilenmediği belirlenmiştir.

Üst Miyosen yaşlı Bakırköy formasyonuna ait fosilli kireçtaşları görünüşleri, kolay işlenebilirlikleri ve elde edilebilmeleri nedeniyle İstanbul'daki tarihi eserlerin birçoğunda (Bozdoğan Kemeri, 368; Topkapı Surları, 5. yy.; Aya Sofya, 6. yy.; Örmeli Sütun, 9. yy.; Topkapı Sarayı, 16. yy.; Şehzade Mehmed Camii, 16. yy.; Beyazıt Kulesi, 19. yy.) kullanılmıştır (Şekil 1). Tarihi eserlerin önemli bir kısmında kullanılmalarının yanı sıra, çevresel faktörlerden fazla etkilenen bir doğal taş çeşidi olması nedeniyle bu çalışmada Bakırköy kireçtaşının kirlenme ve ayrışması incelenmiştir.



Şekil 1. Şehzade Mehmed Camii'nin güney cephesinin görünümü (16. yy.).

Figure 1. Classical view of the southern part of the Şehzade Mehmed Mosque (16th century).

Bu çalışmada tarihi eserlerde kullanılan taşlar üzerinde öncelikle gözlemsel çalışmalarda bulunulmuştur. Buna göre ayrışma taşın yüzeyinden itibaren 0.1-1.5 cm derinliğe kadar etkin olmuştur. Deneysel araştırmalar, restorasyon çalışmaları sırasında değiştirilmek üzere yerlerinden alınan örnekler üzerinde yapılmıştır (Şekil 2). Laboratuvara getirilen örnekler üzerinde polarizan mikroskobu ile yapılan petrografik araştırmaların yanı sıra X-Işını difraksiyon analizleri ile elektron mikroskobu ara-

tırmaları yapılarak taş yüzeyinde meydana gelen değişimler daha detaylı bir şekilde ortaya konulmuştur. Ayrıca, taş yüzeyinde meydana gelen değişimlerin doğrudan taş kimyası ile ilgili olması nedeniyle taşın dış ve iç yüzeyinden alınan örnekler üzerinde kimyasal analizler yapılmıştır. Kirlenme ve ayrışmanın taşın fiziksel özelliklerinde meydana getirdiği değişimleri belirlemek amacıyla laboratuvarında bir seri deneyler yapılarak taşın taze ve ayrılmış kısımlarına ait özgül ağırlık, birim ağırlık ve porozite gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir.

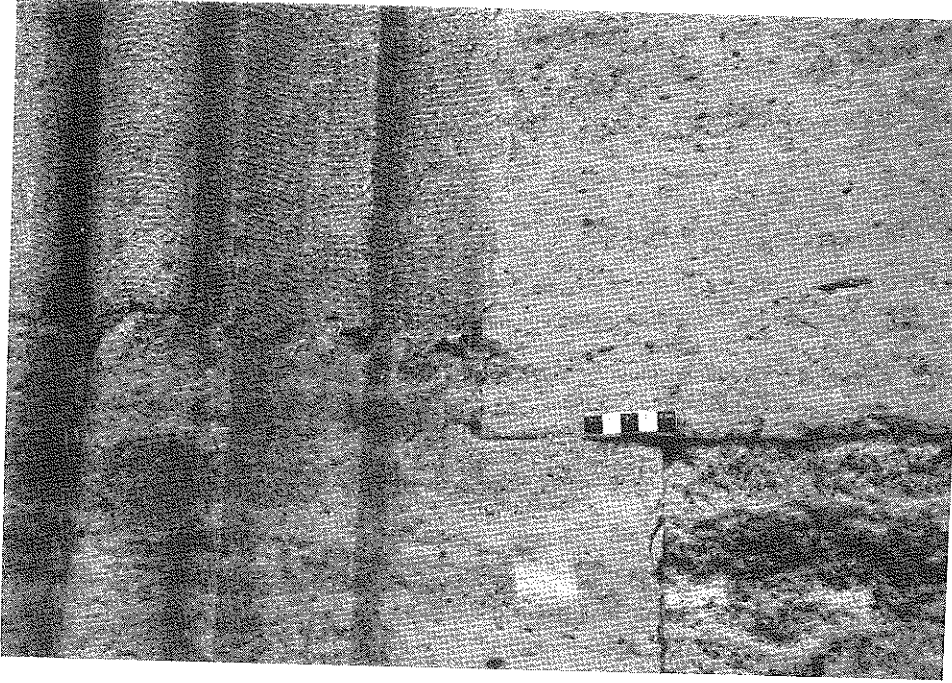
## BAKIRKÖY KİREÇTAŞININ GENEL KARAKTERİSTİKLERİ

Üst Miyosen yaşlı, sarımsı-gri renkli Bakırköy kireçtaşı İstanbul'un batı yakasında yaygınca yüzeylenmektedir (Şekil 3). Alt düzeyleri ince taneli, ince-kalın katmanlı, bol çatlaklı, bol fosil kavkılı ve erime boşluklu olan formasyonun, üst düzeyleri ise killi ve kumlu olup yer yer kireçtaşı ve kil arda lanmasından oluşmaktadır. Bunların çoğu iyi çimentolanmış ve yönlenmiştir. Bu kireçtaşları bol miktarda *Mactra*, *Melanopsis*, *Helix* fosilleri ile krinoid parçaları içermektedir (Sayar ve Pamir, 1933; Arıç, 1955). Fosillerin boyut, şekil ve miktarları değişkenlik sunmaktadır. Kireçtaşlarının daha çok alt düzeyleri tarihi eserlerde kullanılmıştır. Bu taşların taze yüzeyleri ak-krem renkli olup, kirlenince dış yüzeyleri kahverengi ve özellikle koyu siyaha dönüşmektedir. X-Işınları kırınımı analiz sonuçlarına göre; kireçtaşları %97-99 arasında kalsit ile %1-3 arasında kuvars içermektedir. Ayrıca kireçtaşları polarizan mikroskobu ile yapılan çalışmalar ile Folk (1962)'ye göre biyosparit olarak sınıflandırılmıştır.

## KİREÇTAŞLARININ KİRLENME VE AYRIŞMASI

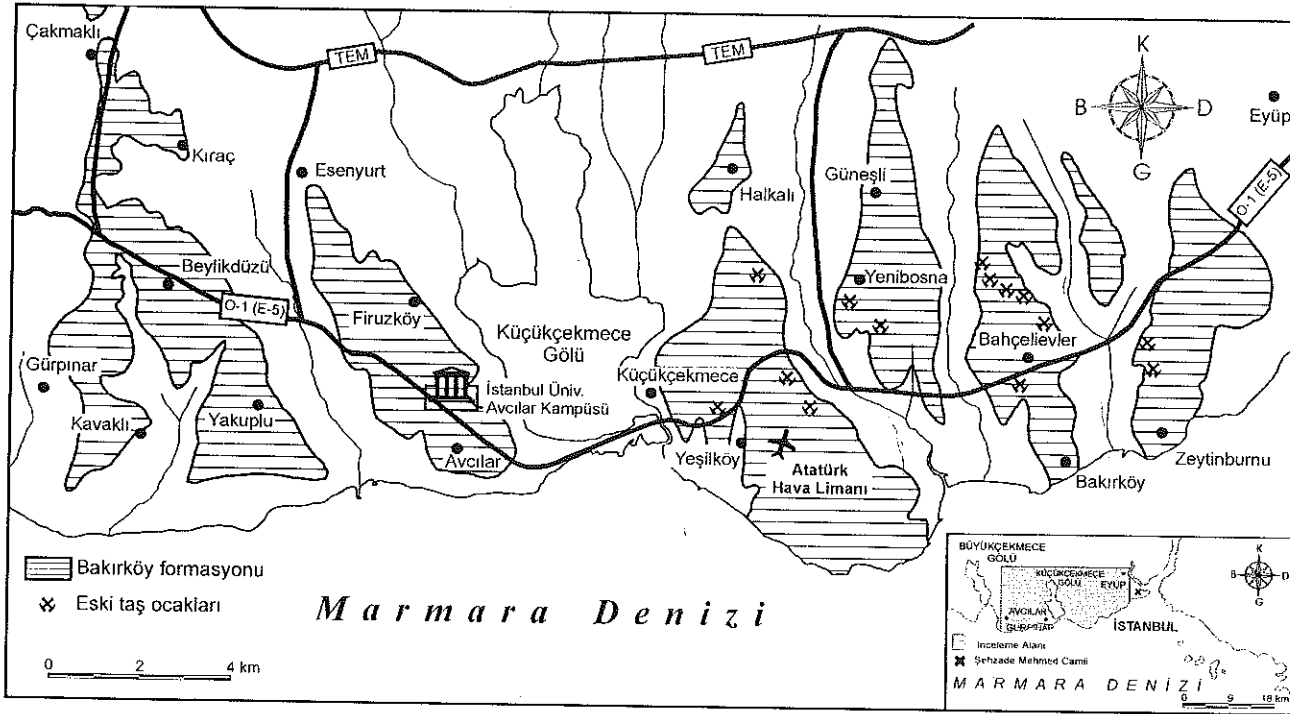
Kireçtaşlarının kirlenme ve ayrışması karmaşık bir olaydır. Atmosferik parametreler ile yağmursuyu kirlenmede etkin faktörleri oluşturmaktadır. Hayvanlar, bitkiler ve bakterilerin etkisi de oldukça önemlidir. Bu parametreler, yapıda kullanıldığından itibaren taşa etki ederler. Bunların etkileri; etki süreleri ile taşın fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Kireçtaşlarındaki kirlenme ve ayrışma türleri ile bunların etkileri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Su (nem, yağmur suyu, kapiller su) taşların



Şekil 2. Şehzade Mehmed Camii'nin kuzey duvarı. Restorasyon çalışmaları sırasında ayrılmış kireçtaşının yerine konulan kireçtaşı bloku.

Figure 2. Northern wall of the Şehzade Mehmed Mosque showing replaced limestone during restoration studies.



Şekil 3. Bakırköy kireçtaşının dağılımını gösterir harita (Arıç 1955'den değiştirilerek hazırlanmıştır).

Figure 3. Map showing location of Bakırköy limestone (Modified from Arıç 1955).

Tablo 1. Ayrışma ve kirlenme türleri ile etkileri.

Table 1. Type and effects of deterioration

Ayrışmaya Neden Olan Faktörler	Ayrışma Türleri	Kirlenme Türleri	Etkiler
<ul style="list-style-type: none"> <li>• İnsan etkileri</li> <li>• Yağmur suyu</li> <li>• Klimatolojik faktörler</li> <li>• Endüstriyel duman</li> <li>• Egzos gazı</li> <li>• Asılı maddeler</li> <li>• Nem</li> <li>• Bitki kökleri</li> <li>• Yosun ve likenler</li> <li>• Kuş dışkıları</li> <li>• Yeraltısuyu yükselimi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atmosferik etkenlerin penetrasyonu</li> <li>• Eriyebilir tuzların etkisi</li> <li>• Erime</li> <li>• Taşın fiziksel parçalanması</li> <li>• Taş yüzeyinin korozyonu</li> <li>• Islanma-kuruma</li> <li>• Donma-çözülme</li> <li>• Kapiller suyun etkisi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tozlar</li> <li>• Yakıt artıkları (is, kurum)</li> <li>• Yağlar</li> <li>• Tuz kırıntıları</li> <li>• Başka yapı elemanlarının zararlı yan ürünleri</li> <li>• Yağlı boyalarla boyamak, afiş vb. yapıştırılması</li> <li>• Kuş vb. hayvanların dışkıları</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taşın boyut, şekil ve dokusunda değişimler</li> <li>• Yüzey alanında artış</li> <li>• Porozitede artış</li> <li>• Siyah kabuk oluşumu</li> <li>• Yüzey pürüzlülüğünde artış</li> <li>• Taş yüzeyinde oyma vb. İşçiliklerin bozulması</li> </ul>

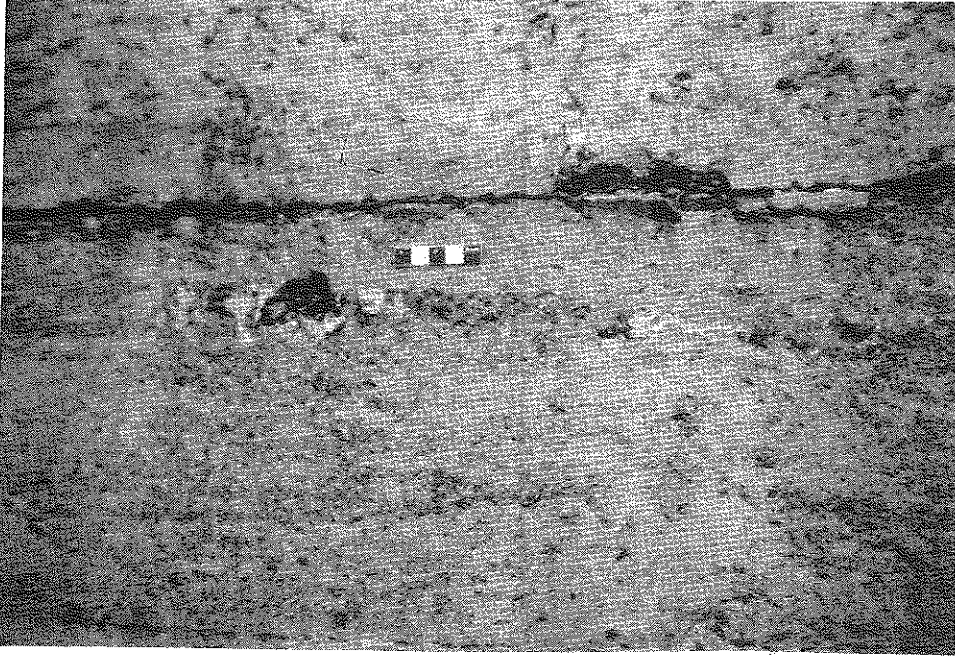
kirlenmesinde önemli faktörlerden biridir. Su, aşındırıcı ve eritici etkisinin yanısıra bileşik yapılarak asit oluşturur, donarak parçalar, demir kısımların paslanmasını kolaylaştırır, kirlerin yüzeye yapışmasını sağlar ve bitkilerin gelişmesine sebep olur (Meisel, 1988). Zararlı etkilerinin yanı sıra suyun taşlar üzerindeki çözülebilen zararlı maddeleri temizleme özelliği de vardır. Ancak bu durum sürekli yağış alan kısımlarda söz konusudur. Bakırköy kireçtaşının bol fosil kavkılı, çatlaklı ve erime boşluklu olması suyun hareketini ve ikincil tuz oluşumlarını hızlandırarak ayrışmayı arttırmaktadır.

Atmosferin kimyasal bileşimi meteorolojik ve klimatolojik faktörler ile insan aktiviteleri ile ilgilidir. Atmosfer hacimsel olarak %78 azot, %21 oksijen ve %1 karbondioksit, argon ve diğer gazları içerir. Atmosfer ayrıca, su buharı, kükürt dioksit, kükürt trioksit, azotoksit, klor gibi gazları da ihtiva eder (Winkler, 1973). Bu gazlar ve onların atmosferde oluşturdukları asit bileşenleri eritir, açığa çıkan tuzlar gözeneklerde birikir. Gözenek ve benzeri süreksizlik ara yüzeyinde biriken tuz konsantrasyonu taşın su emme yeteneğini artırır. Havadaki bağıl nem değişimine koşut olarak bu tuzlar taş yüzeyi ile yapı derinliği boyunca sürekli yer değiştirir. Koyu renkli taşlarda çiçeklenme şeklinde beliren tuz konsantrasyonu, hava kirliliği sonucu yapı çevresinde bulunan partikülleri de bünyesine alarak kirliliği oluşturur (Erdoğan, 1981). Atmosfer içerisindeki kirliliği oluşturan partikül miktarı ve boyutu yerden yükseklik arttıkça azalır, ancak nem oranı yükseldikçe artar. Taş üzerindeki kimyasal etkiler, suyun taş yüzeyine çözücü olarak etki etmesi ve bunun yanında su içerisindeki CO<sub>2</sub> gibi çö-

zünmemiş kalıntılar nedeniyle oluşmaktadır. (Su hem taşın yüzeyini temizliyor, hem de içerisindeki CO<sub>2</sub> temiz yüzeyi bozuyor.)

Atmosferde bulunan ve özellikle kireçtaşlarını etkileyen gazlardan olan CO<sub>2</sub>'in kaynağı endüstriyel dumanlar, otomobil egzostlarından çıkan dumanlar ve biyosferik aktivitelerdir. Biyosferik kaynak; bitkilerin gece boyunca fotosentez neticesinde atmosfere vermiş oldukları CO<sub>2</sub>'tir. Bu gaz yağmur suyu ile birleşerek kireçtaşını eriten karbonik asidi oluşturmaktadır. Kireçtaşlarının erimesi ile suda çözünen CO<sub>2</sub> miktarı arasında sıkı bir ilişki söz konusudur. Karbonmonoksit (CO) ise fosil yakıtlarının tamamen yanmamasından kaynaklanmaktadır. Karbonmonoksitin direkt olarak taş üzerinde herhangi bir korozif etkisi yoktur. Ancak SO<sub>2</sub>'nin okside olarak SO<sub>3</sub>'ü oluşturması sırasında kataliz olarak etki eder.

Kireçtaşları açısından atmosferde bulunan gazlardan en tehlikelisi olan SO<sub>2</sub>, yakılan fosil yakıtların kükürt içeriğine oranla havaya karışmaktadır (Sorguç, 1990). Kireçtaşları ortamda bulunan SO<sub>2</sub>'ye karşı oldukça duyarlıdır (Gauri ve Holdren, 1981). Lockat (1977) ile Jaynes vd. (1987)'nin ifade ettikleri gibi bozunmanın artışı atmosferdeki SO<sub>2</sub> konsantrasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Sülfür bileşenleri karbonatları sülfatlara dönüştürerek hacim artışına neden olurlar. Böylece çatlamlara, ufalanmalara ve kabuklanmalara sebep olurlar (Sorguç, 1990) (Şekil 4). Aydın vd. (1994), tarafından İstanbul için 1989-1994 tarihleri arasındaki zamanı kapsayan kış dönemi SO<sub>2</sub> dağılımını gösteren bir harita hazırlanmıştır (Şekil 5). Bu haritaya göre



**Şekil 4.** Şehzade Mehmed Camii duvarındaki siyah kabuk oluşumu (Ölçekteki her bir kare 1 cm'dir.).

*Figure 4. Wall of the Şehzade Mehmed Mosque showing Black gypsum crust. Each scale bar represents 1 cm.*

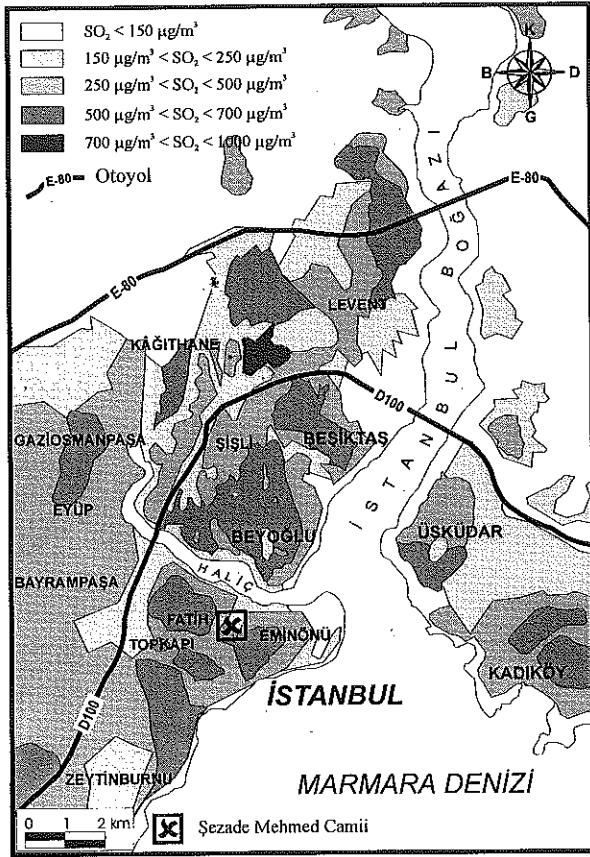
tarihi yapıların yaygın olduğu İstanbul'un batı yakası yüksek SO<sub>2</sub> değerlerine sahiptir.

Taş ayrışmasında rol oynayan pek çok etken-den biri olan ısı değişimleri çeşitli olaylar sonucun-da oluşan kabuklanmaların dökülmesine, bir arada kullanılmış fakat farklı genleşme katsayılarına sahip taşların ara yüzlerinin bozulmasına neden olmaktadır (Şekil 6). Özellikle Bakırköy kireçtaşı gibi ince boşluklara sahip taşların önce kuvvetlice ısınıp ardından aniden soğuması yüzeyde ince çatlaklar oluşturur. Böyle durumlara güneş ışınlarının ısıttığı yerlere aniden yağmurun gelmesi sebep olur (Meisel, 1988).

Bakırköy kireçtaşının kirlenme ve ayrışmasında rüzgarın etkisi de oldukça önemlidir. Rüzgarın en önemli etkileri mekanik olarak yüzeyi zamanla aşındırması, havadaki gaz, partikül ve yağmuru taş yüzeyine hakim rüzgar yönünde savurmasıdır (Meisel, 1988). Yapıların özellikle ince işçilikli ve yüksek kesimlerinde rüzgarın aşındırıcı etkisi kendisini belli etmektedir. İstanbul'da özellikle kış aylarında kuzey ve kuzeydoğudan esen sert rüzgarlar yapıların bu kesimlerinde fazla bir kirlenme ve ayrışmaya yol açarak bu alanlardaki tarihi yapılarda kullanılan taşların da etkilenecek zarar görmesine neden olur. Bunun yanında taşın yüzeyindeki suyu

makro gözeneklerden taşın içerisine itici ve ıslanmış kesimleri kurutucu etkisi de söz konusudur. Rüzgar ayrıca havaya karışan zararlı gaz ve partikülleri uzun mesafelerde taşıyarak sanayi alanlarına uzak yerlerdeki eserlerin de etkilenmesini sağlamaktadır.

Kirlenme ve ayrışmaya neden olan canlılar arasında bakteriler, bitkiler, hayvanlar ve insanlar gelmektedir. Bunlar mekanik ve kimyasal etkilerle taşta zarar verebilmektedir. Bakteriler, kireçtaşlarında kalsiyum nitratin (Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) oluşmasında rol almaktadır (Winkler, 1973). Şehirlerde veya endüstriyel alanlardaki tarihi eserlerin yüzeylerindeki liken ve yosunlar, is veya sülfatların bulunduğu yüzeylerde gelişmemektedir. Schaffer (1932), liken ve yosunların taşlar üzerindeki etkilerini detaylı araştırmıştır. Birlikte yaşayan liken, alg ve mantarlar herhangi bir şekilde toprağa gereksinim duymadan taşın çıplak yüzeyine yapışarak yaşarlar ve yavaş gelişirler. Bunlar zamanla humusun gelişmesine ön ayak olurlar ve yüksek bitkilerin gelişmesini sağlarlar (Şekil 6 ve 7). Likenlerin pürüzlü yüzeylere sahip olmaları ve süngersi özellikte olmaları nedeniyle suyu uzun süre bünyelerinde tutarlar ve bu sayede taş yüzeyinin uzun süre nemli kalmasını sağlarlar. Taş, suyu yüzeyinden atamadığından do-



Şekil 5. İstanbul kış dönemi hava kirliliği ( $SO_2$ ) haritası (1989-1994).

Figure 5.  $SO_2$  pollution map of Istanbul (1989-1994).

layı ayrışmaya başlar. Likenler ayrıca, taş yüzeyinde iyon değişimine neden olmaları ve asit salgılamaları nedeniyle taşın yüzeyini bozarlar (Keller ve Fredericson, 1952).

Yapılara konan, ya da yuvalanan kuşlar dışkılarını bırakarak yapıyı kirletmekte ve burada kullanılan taşların ayrışmasına neden olmaktadır. Çok miktardaki dışkılar fosforik ve nitrik asit içerir. Bunlarda kimyasal olarak karbonatla reaksiyona girerek kalsiyum fosfat ve bazı nitratları oluşturur. İnsanlar daha çok mekanik yollardan taşlara zarar vermekte, böylece daha kolay bozunmalarını sağlamaktadır.

## BULGULAR

DeneySEL çalışmaların üzerinde yapıldığı Bakırköy kireçtaşına ait örneklerin büyük çoğunluğu restorasyon çalışmalarının yapıldığı Şezade Mehmed Camii'nden alınmıştır. Örneklerdeki kirlenme ve ayrışma yüzeyden itibaren 0.1-1.5 cm derine iş-

lemiştir. Bu nedenle laboratuvar araştırmaları için derlenen blokların kirlenmeye maruz kalmış dış yüzeyi ile iç yüzeyinden birer dilim alınmıştır. Petrografik, mineralojik ve kimyasal analizler ile fiziksel özellikleri belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar, bu örnekler üzerinde yapılmıştır. Ayrışma sonucunda petrografik, mineralojik, kimyasal ve fiziksel özelliklerde meydana gelen değişimler aşağıda sunulmuştur.

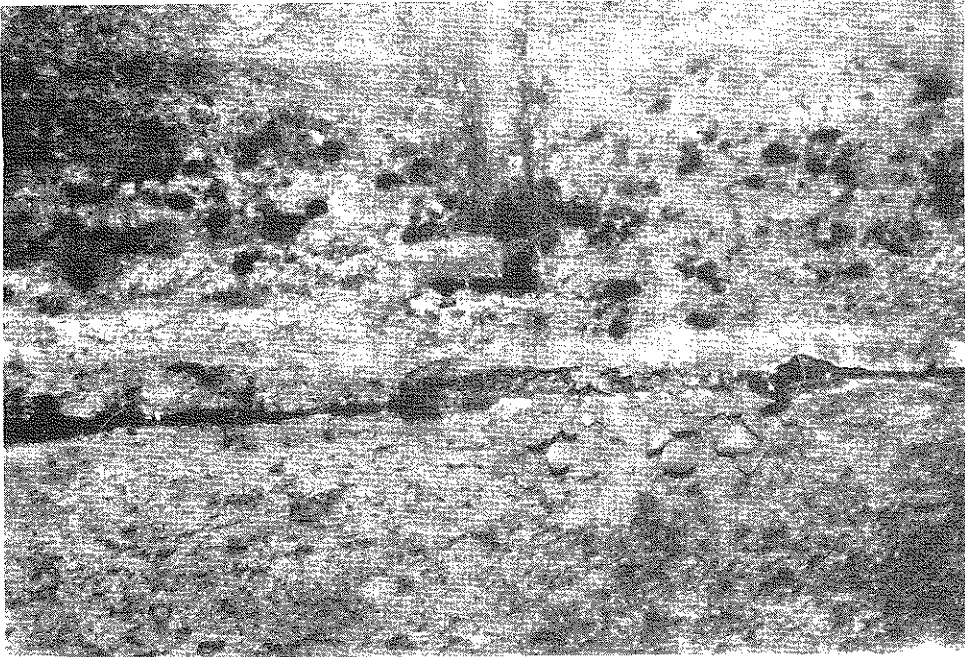
## Petrografik ve mineralojik özelliklerde meydana gelen değişimler

Petrografik ve mineralojik çalışmalar kireçtaşı bloklarının dış ve iç kısımlarından alınan örnekler üzerinde yapılmıştır. Petrografik açıdan kireçtaşlarının yüzeyinde önemli bir değişim sözkonusu değildir. Şekil 8a, b, c ve d'de görüldüğü gibi bazı taşlardaki boşluk miktarı ayrışma nedeniyle artmıştır. Kireçtaşları içindeki boşlukların tipi, boyutu ve sayısı taşın içerdiği fosillerin boyutları ve kayaç fabriği ile ilgilidir. Taze ve kirlenmiş kireçtaşı örnekleri üzerinde X-ışını difraksiyon analizleri de yapılmış olup, bu analizlerden elde edilen XRD grafikleri Şekil 9'da sunulmuştur. Bu şekilde görüldüğü gibi, kireçtaşlarının bileşimi büyük oranda kalsittir (A Gurubu), ancak bazı kireçtaşı örnekleri en fazla %7 oranında kırıntılı malzeme (özellikle kuvars ve plajioloklas) içermektedir (B Gurubu). Özellikle A gurubuna ait bazı kireçtaşlarının yüzeylerinde jips oluşumuna rastlanmıştır. Kirlenme ve ayrışma ile kireçtaşlarının yüzeyinde meydana gelen değişimler elektron mikroskopu çalışmaları ile de gözlenmiştir. Şekil 10a ve b'de görüldüğü gibi; kireçtaşlarının yüzeyi oldukça boşluklu bir yapıya sahiptir. Bazı taşların yüzeyinde özellikle eriyebilir tuzların ve asılı maddelerin etkisi ile siyah kabuk gelişmiştir.

İstanbul'daki yoğun hava kirliliği özellikle  $CaCO_3$  içeren yapı taşlarını bozmakta ve yüzeyde jips oluşumuna neden olmaktadır. Jips oluşumu taşın gözenekliliğini arttırmakta ve direncini düşürmektedir. Kalsitin uzaklaşması sonucu meydana gelen porozite artışı ve boşluklarda kalsite göre daha büyük molar hacme sahip jipsin kristallenmesi sırasında oluşan gerilmeler, taşın direncini azaltmakta ve böylece kabukta çatlak ve gözenekliliğe neden olmaktadır (Lewin ve Charola, 1978). Ayrıca kalsit ile jipsin termal genleşme katsayılarının farklı olmasından dolayı, kabukta önemli miktarda çatlak ve boşluklar meydana gelmektedir (Haynie, 1983).



**Şekil 6.** Farklı özellikteki kireçtaşlarındaki ayrışma.  
*Figure 6. Weathering of different types of limestone.*



**Şekil 7.** Kireçtaşı yüzeyinde gelişen liken ve yosunlar.  
*Figure 7. Lichens and mosses growing on the limestone surface.*

### Kimyasal bileşimde meydana gelen değişimler

Taze kireçtaşları üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçlarına göre kireçtaşları %52.31-55.27 CaO, %0.96-3.00 SiO<sub>2</sub>, %0.25-1.00 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %0.11-0.42 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.22-0.81 MgO, 0.10-0.17 Na<sub>2</sub>O, %0.06-0.17 K<sub>2</sub>O içermektedir (Tablo 2). Kirlenme ve ayrışma sonucunda kireçtaşlarının yüzeyinde meydana gelen siyah kabuk ise %35.04 CaO, %5.80 SiO<sub>2</sub>, %1.55 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %0.90 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %0.70 MgO, %0.48 Na<sub>2</sub>O, %0.30 K<sub>2</sub>O, %5.75 C/TOP ve %8.93 S/TOP içermektedir. Bu sonuçlara göre, kireçtaşı bloklarının dış yüzeylerindeki SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O ve S/TOP yüzdeleri taze olan iç yüzeylerine oranla daha fazladır.

Tablo 2. Farklı kireçtaşı örneklerinin kimyasal bileşimleri

Table 2. Chemical compositions of the different limestone samples.

Ana element oksit (%)	Örnek No:					
	A1U	A1BC	A2U	A2W	BU	BW
SiO <sub>2</sub>	0.96	5.80	1.25	1.83	3.00	4.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	1.55	0.43	0.67	1.00	1.38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	0.90	0.20	0.31	0.42	0.59
MgO	0.22	0.70	0.45	0.47	0.81	0.76
CaO	55.24	35.04	55.27	53.96	52.31	51.40
Na <sub>2</sub> O	0.12	0.48	0.10	0.11	0.17	0.13
K <sub>2</sub> O	0.06	0.30	0.06	0.09	0.17	0.23
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.10	0.02	0.02	0.05	0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.16	0.03	0.02	0.07	0.06
MnO	0.02	0.03	0.02	0.02	0.07	0.06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	0.004	0.003	0.001	0.006	0.004
C/TOT	11.88	5.75	11.86	11.86	11.69	11.25
S/TOT	0.06	8.93	0.01	0.04	0.02	0.02
SUM	100.3	75.5	100.4	99.7	100.3	100.3

A: A Gurubu, B: B Gurubu

U: Ayrışmamış, W: Ayrışmış, BC. Siyah kabuk

Tablo 3. Kireçtaşlarının fiziksel özellikleri

Table 3. Physical properties of the limestones.

Örnek no:	Özgül ağırlık	Kuru birim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	Doğun birim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	Ağırlıkça su emme (%)	Efektif porozite (%)	Toplam porozite (%)
AU	2.60-2.64	19.3-23.1	21.8-24.2	5.80-13.20	6.38-17.69	10.81-26.89
AW	2.59-2.62	17.6-22.9	20.8-24.1	5.00-8.40	4.23-13.62	11.92-32.82
BU	2.63-2.64	22.4-23.8	23.4-24.8	4.10-4.50	5.42-9.84	9.51-14.83
BW	2.61-2.62	21.4-22.8	23.3-24.9	4.50-8.90	9.92-12.79	12.98-18.32

A: A Gurubu, B: B Gurubu, U: Ayrışmamış, W: Ayrışmış

Kireçtaşları genellikle %7'den az erimeyen madde içermektedir. A gurubuna ait kireçtaşlarındaki CaCO<sub>3</sub> içeriği %96-100 arasındadır. Bu oran B gurubuna ait kireçtaşlarında %93-95 arasında değişmektedir.

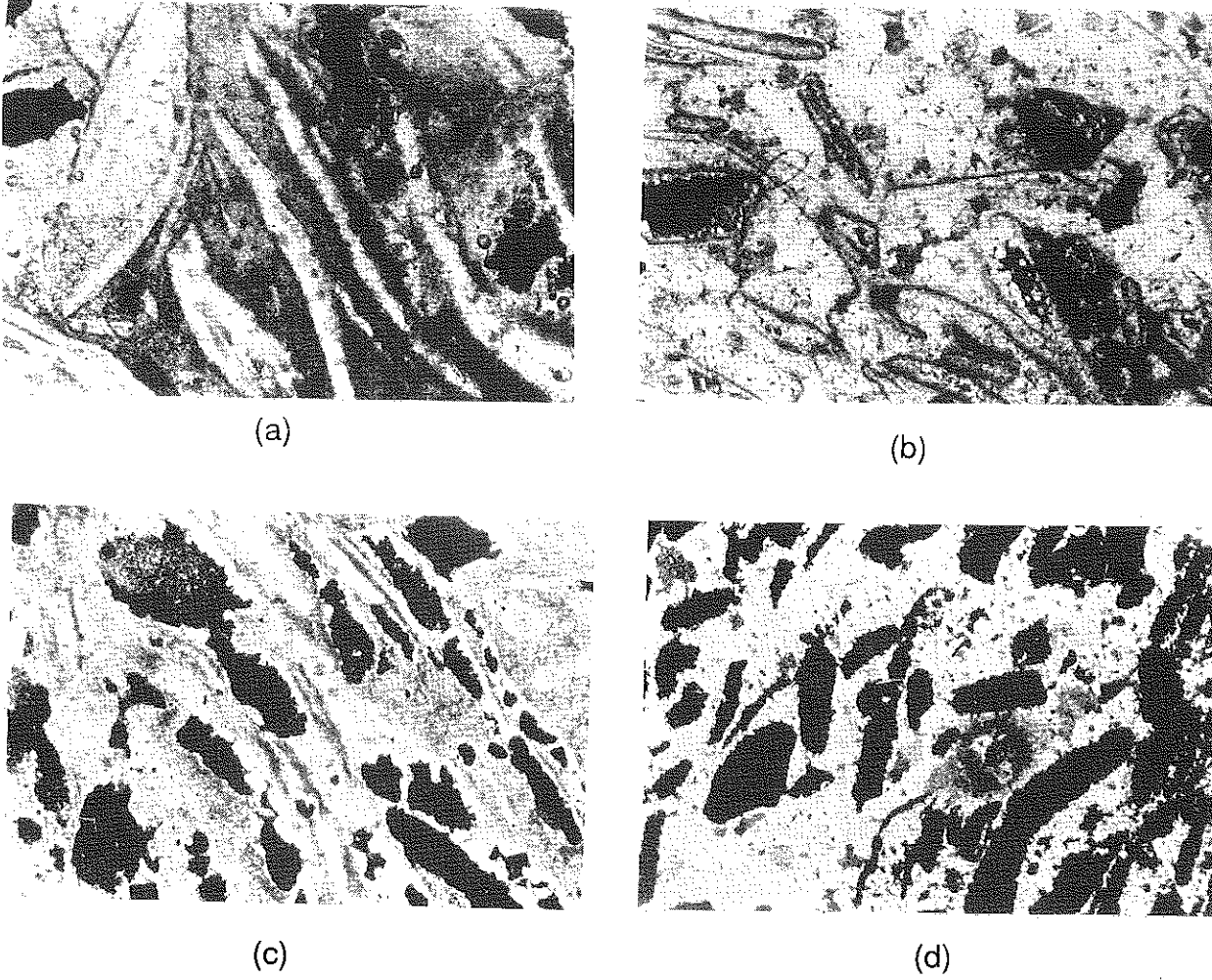
### Fiziksel özelliklerde meydana gelen değişimler

Ayrışmış ve ayrışmamış kireçtaşlarına ait özgül ağırlık, kuru ve doymun birim ağırlık, ağırlıkça su emme, efektif ve porozite ISRM (1981)'de önerilen esaslara uyularak belirlenmiştir. Sonuçlar Tablo 3'de sunulmuştur. Bu tabloda görüldüğü gibi ayrışma nedeniyle kireçtaşlarının fiziksel özelliklerinde bir değişim söz konusudur. Kireçtaşlarına ait boşluk çapı dağılımı civa porozimetresi ile belirlenmiştir. Ayrışma ve kirlenmeyi denetleyen önemli parametrelerden biri olan porozite ve boşluk çapı dağılımı kireçtaşlarının heterojenliği ile ilgili olarak çok değişkendir. Birçok araştırmacının da ifade ettiği gibi çapı 0.1 µm'nin altında olan boşluklar (mikropor) taşın ayrışabilirliğini (özellikle tuzların kristallenmesi ve donma-çözülme) önemli oranda etkilemektedir. Şekil 11'de görüldüğü gibi A gurubuna ait kireçtaşlarında makroporlar, B gurubuna ait kireçtaşlarında ise mikroporlar çoğunluktadır.

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Atmosferdeki mevcut su, gaz, ısı değişimi ve rüzgar gibi parametreler, pek çok tarihi yapıda kullanılmış olan Bakırköy kireçtaşı üzerinde büyük bir etkiye sahip olup, bu taşların zaman içinde ayrışma ve kirlenmesine neden olmaktadır. Gözlemsel ve deneysel bulgular bu etkilerin basit bir şekil-





Şekil 8. Fosilli kireçtaşlarının doku ve boşluklarını gösterir incekesit fotoğrafı a. A Grubu (ayrışmamış) b. A Gurubu (ayrışmış) c. B Gurubu (ayrışmamış) d. B Gurubu (ayrışmış) (25X, çapraz nikol).

Figure 8. Optical micrograph of a shell limestone showing the voids and texture a. Group A (unweathered) b. Group A (weathered) c. Group B (unweathered) d. Group B (weathered) (25X, cross-polarized light).

de ifade edilemeyecek karmaşık ve birçok parametreye bağlı mekanizmalar ile geliştiğini göstermiştir.

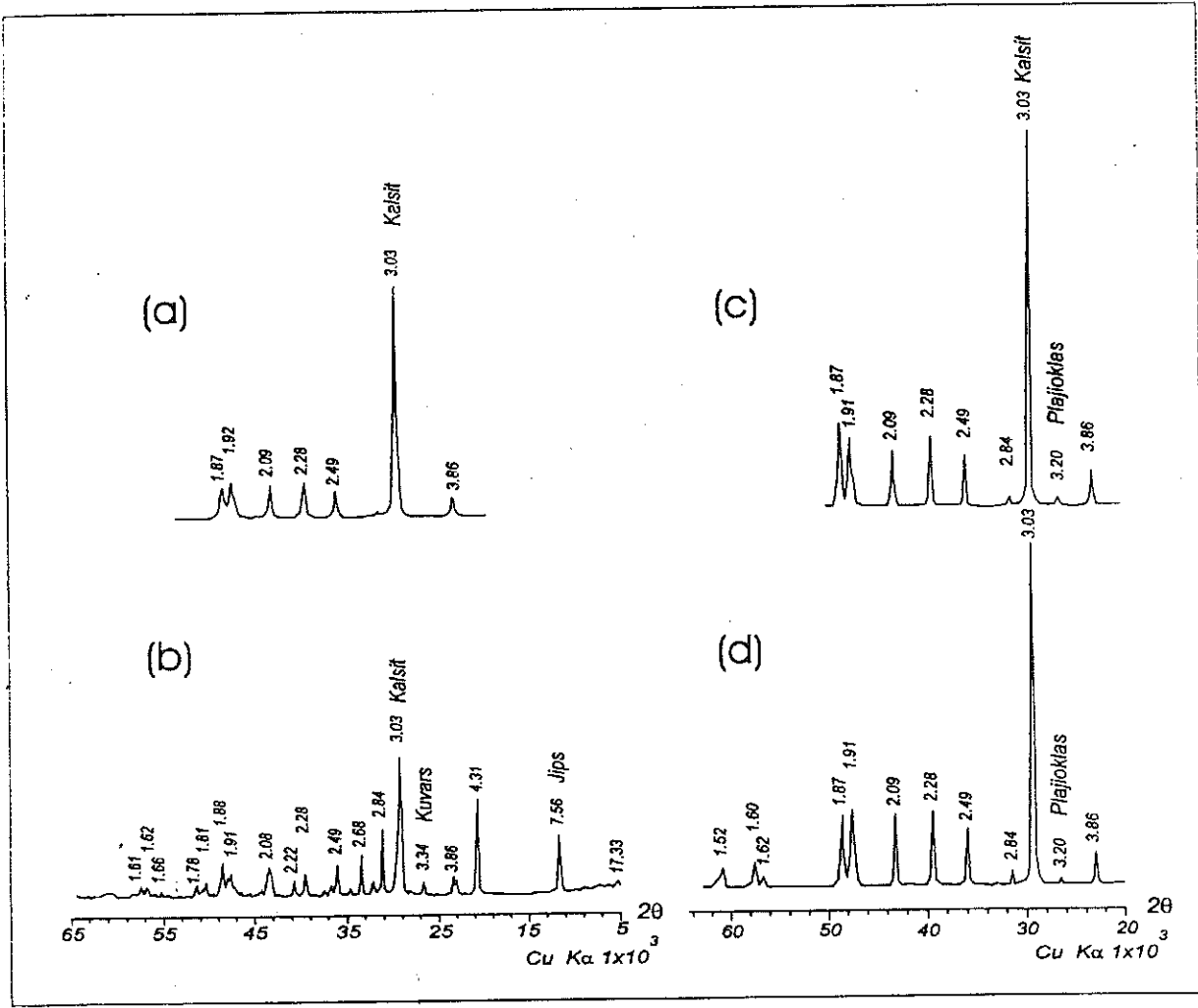
İstanbul'daki yoğun hava kirliliğinin özellikle  $\text{CaCO}_3$  içeren yapı taşlarını bozduğu ve bunların yüzeyinde jips oluşumuna neden olduğu, bu oluşumun taşın gözenekliliğini arttırdığı ve direncini azalttığı görülmüştür.

Kireçtaşları kimyasal, biyolojik ve fiziksel ayrışma proseslerinin birlikte etkisi sonucunda ayrışmıştır. Organik proseslerin etkisiyle gelişen ayrışma kimyasal etkilere nazaran daha azdır.

Kireçtaşlarının bileşimlerinin yanısıra içerdik-

leri kavkılarının boyutları, miktarları ve yönelimleri ayrışmalarındaki etkin parametrelerden birini oluşturmaktadır. Rüzgar, Bakırköy kireçtaşının killi düzeylerini daha çok aşındırmaktadır.

Yağmur suyu kirlenmenin azalmasında önemli bir etkiye sahip olup, taş yüzeyinin doğal olarak yıkayıp temizlenmesini sağlamaktadır. Bu yüzden Bakırköy kireçtaşının kullanıldığı tarihi yapıların kuzeye bakan tarafları daha temizdir. Hava sirkülasyonu olmayan yerlerde ise kirlenme daha yoğun gözlenmektedir. Fazla yağış almayan nemli bölgeler, ayrışma açısından en tehlikeli bölgeleri oluşturmaktadır. Özellikle zeminden kapiler olarak yükselen suyun da ayrışma üzerinde etkisi büyüktür.



Şekil 9. Kireçtaşı örneklerine ait XRD diyagramları a. A Grubu (ayrışmamış) b. A Grubu (ayrışmış) c. B Grubu (ayrışmamış) d. B Grubu (ayrışmış).

Figure 9. The XRD diagrams of the limestone samples a. Group A (unweathered) b. Group A (weathered) c. Group B (unweathered) d. Group B (weathered) (25X, cross-polarized light).

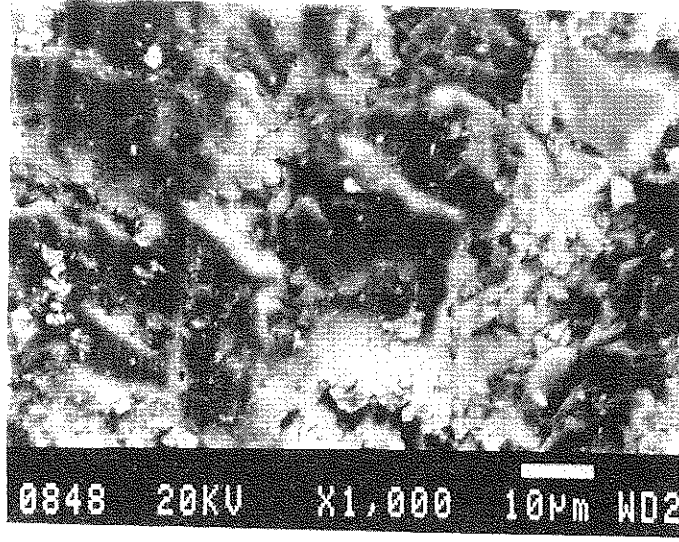
Kullanımları süresince kireçtaşlarının yüzeyinde gelişen kirlilik birkaç milimetreyi geçmemektedir. Kirlilik öncelikle boşluklarda gelişmektedir. Ayrıca bu taşların yüzeylerinde gelişen siyah kabuk oluşumu üniform değildir. Yüzey pürüzlülüğü ise bütün taşların yüzeyinde gelişmektedir.

Farklı özelliklerdeki kireçtaşlarının birarada kullanılması, taşların kesimi, yüzeylerinin işlenme biçimi, traşlanmış olup olmamaları, eserlerde kullanım şekilleri, yapının üst veya temele yakın kesimlerinde veya farklı cephelerde kullanılmaları ayrışmalarını değişik oranlarda etkilemiştir.

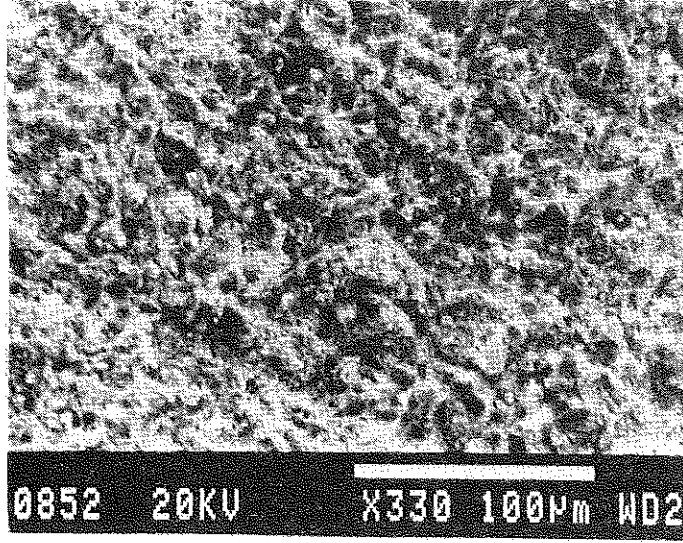
Ayrışma sonucunda kireçtaşlarının kuru birim hacim ağırlıklarında azalma ve efektif porozitelerinde önemli değişikliklerin olduğu anlaşılmıştır.

Efektif porozitelerinde genellikle artış gözlenmesinin yanı sıra, yer yer azalma oluşabilmektedir. Artan porozite, genellikle taş yüzeyindeki erime ve kavkı kırılmaları, azalma ise kirlenme nedeniyle taşların yüzeyindeki gözeneklerin tıkanması ile ilgilidir.

İstanbul'daki tarihi eserlerin büyük çoğunluğunda kullanılmış olan Bakırköy kireçtaşının oldukça gözenekli ve kavkılarının kırılabilir olması nedeniyle bozulan ve kirlenen bu taşların yüzey temizliğinin oldukça dikkatli yapılması gereklidir. Aksi halde temizleme sırasında yüzeyde gelişecek pürüzlülük artışı ile bu taşların daha hızlı bir şekilde kirlenmelerine ve yüzeylerinin ayrışmasına neden olunacaktır.



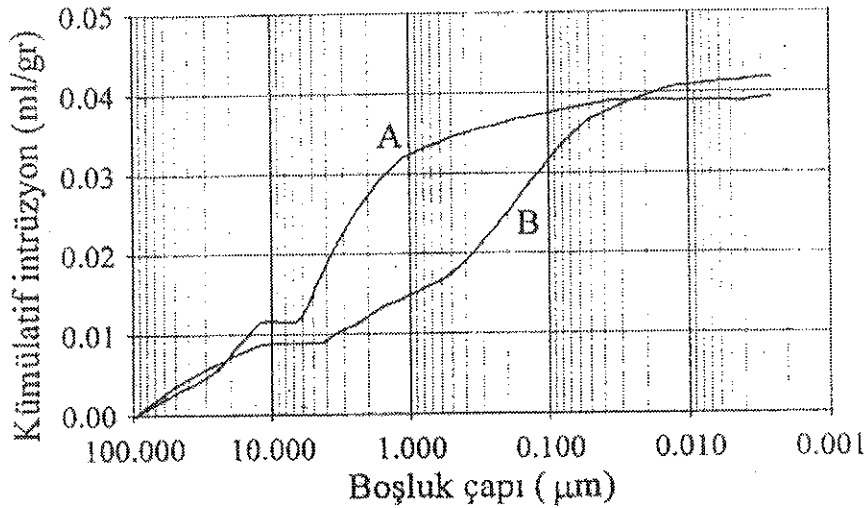
(a)



(b)

Şekil 10. Bakırköy kireçtaşının elektron mikroskopundaki görünümü a. ayrışmamış kireçtaşındaki kalsit kristalleri b. ayrışmış kireçtaşı yüzeyinde gelişen siyah kabuk.

Figure 10. SEM micrographs of Bakırköy limestone a. unweathered limestone surface, showing calcite crystals b. weathered limestone surface, showing black crust formation and high porosity.



Şekil 11. Farklı kireçtaşlarına ait boşluk çapı dağılım eğrileri.

Figure 11. Pore volume versus pore diameter for different types of limestone.

## DEĞİNİLEN BELGELER

- Arıç, C., 1955, Haliç-Küçükçekmece Gölü Bölgesinin Jeolojisi, İTÜ Maden Fakültesi, Doktora Tezi, 48 s.
- Attewell, P.B. and Taylor, 1990, Time-dependent atmospheric degradation of building stone in a polluting environment, Environ. Geol. Water Sci., Vol. 16, No. 1, 43-55.
- Aydın, A., Biricik, A.S., Şahin, C., Kozakçıoğlu, H., Peker, R., Aslantürk, F., Öz, V., Zeytinoğlu, S., Gümüş, U., 1994, T.C. İstanbul Valiliği, İstanbul Kış Dönemi Hava Kirliliği (Kükürt Dioksit) Haritası (1989-1994). İstanbul Valiliği ve Marmara Üniversitesi Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi.
- Bell, F.G., 1993, Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation, Environ. Geol., 21: 187-200.
- Dragovich, D., 1991, Marble weathering in an industrial environment, Eastern Australia, Environ. Geol. Water Sci., Vol. 17, No. 2, 127-132.
- Erdoğan, M., 1981, Yapılarda kullanılan taşlarda gözlenen bozulmalar ve iyileştirme yöntemleri, Mühendislik jeolojisi Türk Milli Komitesi Bülteni, Sayı 4, 22-27.
- Esbert, R.M., Alonso, J., Alonso, F.J. and Ordaz, J., 1995, Suggested properties for evaluating the behaviour of a waterproofed limestone under aggressive environmental conditions, International Colloquium Methods of evaluating Products for the Conservation of Porous Building Materials in monuments, Rome, Iccrom, 331-339.
- Folk, R. L., 1962, Spectral subdivision of limestone types. Classification of carbonate rocks, Symp. Am. Ass. Pet. Geol., Vol.1, 62-84.
- Garcia Pascua N, Sanchez De Rojas MI and Frias M. 1995, Study of porosity and physical properties as methods to establish the effectiveness of treatments used in two different Spanish stones: limestone and sandstone. International Colloquium on Methods of Evaluating products for the Conservation of Porous Building Materials in Monuments, Iccrom, 147-162.
- Gauri, K.L. and Holdren, 1981, Pollutant effects on stone monuments, Environmental Science and Technology, V.15, 386-390.
- Gauri, L.K., 1990, Decay and preservation of stone in modern environments, Environ. Geol. Water Sci., Vol. 15, No. 1, 45-54.
- Grossi, C.M., Esbert, R.M., 1994, Weathering of building carbonate rocks under SO<sub>2</sub> polluted atmosphere, 7<sup>th</sup> International IAEG Congress, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 503 8, 3573-3582.
- Haynie, F.H., 1983, Deterioration of marble, Durability Building Materials, 1(3), 241-254.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1981, Rock Characterization, Testing and Monitoring, E.T. Brown (ed.), ISRM Suggested Methods, Oxford Pergamon Press, 211 p.
- Jaynes, S.M., Cooke, R.U., 1987, Stone weathering in south east England, Atmospheric Environment, 21(7), 1601-1622.
- Keller, W.D., Fredericson, A.F., 1952, Role of plants and colloidal acids in the mechanism of weathering, American Journal Science, 250, 594-608.
- Kertész, P., 1990, Decay and conservation of Hungarian building stones, Environ. Geol. Water Sci., Vol. 16, No. 1, 3-7.
- Keskinler, B., İpekoğlu, B., Dams, Ü., Acar, F. ve Özbay, O., 1994, Hava kirliliğinin Erzurum'da tarihi yapılara etkisi, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, V. 18, 169-174.
- Lewin, Z. and Charola, A.E., 1978, Scanning Electron Microscopy in the diagnosis of "Diseased" stone, Scanning

- Elektron Microscopy, 1, 695-703.
- Lockat, S., 1977**, Stone deterioration at Cologne Cathedral and other monuments due to action of air pollutants, Proceedings Fourth International Clean Air Conference, Tokyo, 120-128.
- Meisel, U., 1988**, Naturstein-Erhaltung Und Restaurierung Von Außenbauteilen, Baverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 196 p.
- Moropoulou, A., Charitaras, B., Lavas, G., Penelis, G., Zias, N., Biscontin, G., Kollias, E., Paisios, A., Theoulakis, P., Bisbikou, K., Bakolas, A. and Theodoraki, A., 1993**, Weathering phenomena on the Hagia Sophia Basilica Konstantinople, Soil Dynamics and Earthquake Engineering VI., Çakmak, A.S. and Brebbia, C.A. (ed.), Computational Mechanics Publications, 923-942.
- Sayar and Pamir, 1933**, Une Foune de Vertebre Fossile Miocene Pres d'Istanbul, C. R. Soc. Geol. Fr., V.6. Paris.
- Schaffer, R. J., 1932**, The weathering of natural building stones. Dept., Sci. Ind. Res., Bldg. Res, Special Rept., 18, 1-149.
- Sorguç, H., 1990**, Geleneksel Kargir Yapıların Restorasyonunda Teknoloji ve Malzeme Sorunları, Yüksek Lisans tezi, Mimar Sinan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 141 sf.
- Winkler, E.M., 1973**, Stone: Properties, Durability in Man's Environment, Springer-Verlag, Wien, New York, 230p.

**Makalenin geliş tarihi:** 30.12.1998

**Makalenin yayına kabul tarihi:** 21.05.1999

*Received* December 30, 1998

*Accepted* May 21, 1999

