

12003 - 3

**DOĞAL ZEOLİTLERİN  
HAFİF YAPI ENDÜSTRİSİNDE  
KULLANIMI,**

**Deniz SERBEST  
Yüksek Lisans Tezi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı  
Eylül - 1999**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Deniz SERBEST' in "Doğal Zeolitlerin Hafif Yapı Endüstrisinde Kullanımı" başlıklı Fizik Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi.....09.09.1999.....tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Adı-Soyadı**

**İmza**

Üye (Tez Danışmanı) : Prof. Dr. Ertuğrul YÖRÜKOĞULLARI

Üye : Prof. Dr. Önder ORHUN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tevfik ÜNALDI

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu' nun  
...20.09.1999..tarih ve ....19/2.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## DOĞAL ZEOLİTLERİN HAFİF YAPI ENDÜSTRİSİNDE KULLANIMI

### DENİZ SERBEST

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ertuğrul Yörükoğulları  
1999, Sayfa 49

Giderek artan enerji giderleri, dikkatleri binalarda ısıtma ve soğutma harcamalarına çekmiştir. Yapılarda, doğal zeolitlerden elde edilen hafif yapı malzemelerinin kullanılması ile enerji harcamalarında önemli tasarruflar sağlanmaktadır. Doğal zeolitlerden yapılan hafif yapı malzemeleri, yapının ağırlığını azaltacak ve deprem güvenliğini arttıracaktır. Doğal zeolitlerin hafif yapı endüstrisinde kullanımının, taşıma ve işçilik giderlerinde önemli tasarruflar sağlayacağı gözükmektedir.

Bu çalışmada Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç yörelerinden alınan, içinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunan zeolitik tüf örnekleriyle yapılan deneyler sonucunda, klinoptilolit hafif yapı endüstrisinde kullanımının uygunluğu araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç yörelerinden çıkarılan doğal zeolitlerin kullanılması ile "Anafom" adı verilen hafif yapı malzemesi elde edilmiştir. Anafom, gözenekli ve hafif yapı bir malzemedir. Anafom' un yoğunluğu  $0,2-0,9 \text{ g/cm}^3$ , ısı iletkenlik katsayısı  $0,03 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , sıkıştırma mukavemeti 4-15 MPa, ortalama gözenek çapı  $38,917 \text{ Å}$ , özgül yüzey alanı  $4,49 \text{ m}^2/\text{g}$ , su tutma yüzdesi % 8, asidik direnci % 0,0089, bazik direnci % 0,126, sertliği mosh sertlik derecesi cinsinden 8,5' tur. Anafom diğer yapı endüstrisinde kullanılan malzemelere göre daha kullanışlı, sağlam ve ekonomik gözükmektedir.

Yirmibirinci yüzyılda dünya nüfusunun artmasıyla birlikte enerji giderlerinin de artacağı düşünülecek olunursa, yapılarda anafom kullanılması ile enerji tasarrufundan büyük ölçüde fayda sağlanmış olacaktır. Anafom kullanılması ile sağlam, güvenilir, sağlıklı ve ucuz yapılar inşa edilecektir.

Anahtar Kelimeler: Doğal zeolit, anafom, hafif yapı endüstrisi.

**ABSTRACT**  
**Master of Science Thesis**

**THE USE OF NATURAL ZEOLITES IN THE INDUSTRY**  
**OF THE LIGHT CONSTRUCTION**

**DENİZ SERBEST**

**Anadolu University**  
**Graduate School of Natural and Applied Science**  
**Physics Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Ertuğrul Yörükoğulları**  
**1999, Page 49**

Increasing cost of energy has drawn the attention to the spending cost of heating and cooling of the building. Using the light structure materials from natural zeolites saves the energy and cuts the cost. In addition, this material decreases the building load and increases the safety against the earthquake. Plus it saves on the spending for transportation and workman.

In our work, we had performed some experiments on natural zeolites containing clinoptilolite to see if they are convenient to use them in light structure industries. As a result, we obtained material called "Anafoam" from natural zeolites of Manisa-Gördes and Balıkesir-Bigadiç region. Anafoam is a porous and light material. Its density is 0,2-0,9 g/cm<sup>3</sup>, heat conduction coefficient is 0,03 Wm<sup>-1</sup>°K<sup>-1</sup>, compressive strength is 4-15 MPa, average pore diameter is 38,917 Å, specific surface area is 4,49 m<sup>2</sup>/g, water sorption capacity (%) is 8, acid resistance (%) is 0,0089, alkali resistance (%) is 0,126, hardness of mosh hardness degree kind is 8,5. Anafoam appears more economical strong and convenient than the other materials used in the industry of construction.

The increasing population in 21 st century will increase the energy demand. Using anafoam therefore will be very useful for saving energy. Using anafoam we can construct stronger, safer, healthier and cheaper buildings.

**Keywords: Natural zeolite, anafoam, light construction industry.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim süresince yapıcı yaklaşımı ile her aşamada destek olan, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ertuğrul YÖRÜKOĞULLARI' na teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, her konuda yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Önder ORHUN' a teşekkürlerini sunmayı bir borç bilirim.

Yaşamım boyunca hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan ve beni her zaman büyük bir özveri ile destekleyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. ZEOLİTLER.....	5
2.1. Giriş.....	5
2.2. Zeolitlerin Temel Yapıları ve Özellikleri.....	6
2.3. Doğal Zeolitler.....	9
2.3.1. Doğal zeolitlerin özellikleri.....	9
2.3.2. Önemli doğal zeolit türleri.....	10
2.3.3. Doğal zeolitlerin bazı kullanım alanları.....	12
2.3.3.1. Madencilik sektörü.....	12
2.3.4.2. Metalurji sektörü.....	12
2.3.4.3. Kağıt endüstrisi sektörü.....	13
2.3.4.4. Sağlık sektörü.....	13
2.3.4.5. İnşaat sektörü.....	13
2.3.4. Doğal zeolitlerin kullanımı ile yapılan yapı endüstrisindeki çalışmalar.....	14
2.4. Silisyum Karbür (SiC).....	17
2.4.1. Silisyum karbür elde edilişi.....	17
2.4.2. Silisyum karbürün kristal yapısı.....	18
3. DENEYSSEL YÖNTEMLER.....	21
3.1. X Işınlmasının Kırınımının Toz Kristal Metodu.....	21
3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	22
3.3. Asidik ve Bazik Direnç Tayini Yöntemi.....	24
3.4. Isıl İletkenlik Katsayısı Tayini Yöntemi.....	25
3.5. Sertlik Ölçüm Yöntemi.....	27

4. DENEY SONUÇLARI.....	29
4.1. Zeolit Üzerinde Yapılan Deneilerin Sonuçları.....	29
4.1.1. X-ray difraksiyonu sonuçları.....	29
4.1.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları.....	29
4.1.3. Kimyasal analiz sonuçları.....	29
4.1.4. Porozite sonuçları.....	30
4.1.5. Yoğunluk tayini sonuçları.....	30
4.1.6. Su tutma sonuçları.....	31
4.1.7. Isıl iletkenlik katsayısı tayini sonuçları.....	31
4.1.8. Sertlik ölçüm sonuçları.....	31
4.2. Anafom Üzerinde Yapılan Deneilerin Sonuçları.....	32
4.2.1. Anafom hazırlanması.....	32
4.2.2. Anafom' un yoğunluk tayini sonuçları.....	37
4.2.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları.....	38
4.2.4. X-ray difraksiyonu sonuçları.....	38
4.2.5. Mukavemet sonuçları.....	38
4.2.6. Porozite sonuçları.....	39
4.2.7. Su tutma sonuçları.....	39
4.2.8. Asidik ve bazik direnç tayini sonuçları.....	39
4.2.9. Isıl iletkenlik katsayısı tayini sonuçları.....	40
4.2.10. Sertlik ölçüm sonuçları.....	40
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	41
6. KAYNAKLAR.....	43
7. EKLER.....	46
EK-1. Manisa-Gördes yöresine ait XRD grafiği.....	46
EK-2. Balıkesir-Bigadiç yöresine ait XRD grafiği.....	47
EK-3. Elde edilen anafom' un SEM fotoğrafı.....	48
EK-4. Elde edilen anafom' un XRD grafiği.....	49

## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. $\text{Si}^{4+}$ veya $\text{Al}^{3+}$ iyonunun $\text{O}^{2-}$ iyonları tarafından çevrelenerek oluşturduğu dörtyüzlü $\text{O-O}=\text{a}\sqrt{2}$ , $\text{Si-O}=\text{a}\sqrt{3/2}$	7
2.2. Zeolit yapıyı oluşturan dörtyüzlülerin zincir bağlanmaları	7
2.3. a) Kanallara, doğrusal zincir hidrokarbonların girişi b) Büyük bir zincir hidrokarbonun tutulması	8
2.4. Natrolit yapısında görülen (Si,Al) dörtyüzlülerin oluşturduğu zincir yapı	10
2.5. $\beta\text{-SiC}$ ' ün kristal yapısı	19
2.6. a) $\beta$ - tipi . 3C SiC kristalinde gözlenen özel yapı b) $\alpha$ - tipi : 6H SiC kristalinde gözlenen özel yapı	19
3.1. Toz kristalli x ışınları spektrometresi, (a) düzeneğin yapısı, (b) fotoğraf filmi üzerinde gözlenen girişim deseni	21



## ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Zeolitlerin sınıflandırılması	10
2.2. Silisyum karbürün fiziksel ve kimyasal özellikleri	18
3.1. Bazı maddelerin ısı iletkenlik katsayıları	25
3.2. Mosh sertlik cetveli	28
4.1. Zeolitik tuf örnekleri içindeki oksit yüzdeleri	29
4.2. Kullanılan zeolit örneklerinin elementel analiz sonuçları	30
4.3. Manisa-Gördes yöresine ait zeolitik tuf örneklerinin erime sıcaklıkları	32
4.4. Balıkesir-Bigadiç yöresine ait zeolitik tuf örneklerinin erime sıcaklıkları	33
4.5. Anafom' un sıkıştırma mukavemeti	38
5.1. Anafom' un fiziksel ve kimyasal özellikleri	41
5.2. Değişik yapı malzemelerinin bazı özelliklerinin karşılaştırılması	42

**FOTOĞRAFLAR DİZİNİ**

3.1. X ışınları analiz cihazı	22
3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	23
3.3. Isıl iletkenlik katsayısı ölçümü deney düzeneği	27
4.1. Manisa-Gördes yöresi zeolitik tüflerin tane boyutlu görünümü	35
4.2. Yüksek sıcaklık fırını	36
4.3. Anafom görüntüsü	37

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusu her otuz yılda iki kat artış gösterirken enerji tüketimi on beş yılda iki kata yakın bir artış göstermektedir; ayrıca artan nüfusa paralel olarak gelişen teknolojide enerji talebinin artmasına neden olmaktadır. Bu talebin karşılanması için enerji üretimi amacıyla yapılacak yatırımların ve yeni teknolojilerin özenle seçimi gerekir. Özellikle çevre bilincinin geliştiği ülkelerde, ülkelerin enerji politikasını belirleyen ana faktörler üretimin ekonomik, çevre dostu ve yenilenebilirliğidir.

Günümüzde kamuoyunca kabul gören görüş; “En ucuz enerjinin tasarruf edilen enerji” olduğudur. Enerji verimliliğinin artırılması, kayıpların azaltılması ve atık enerjinin değerlendirilmesi olarak da tanımladığımız enerji tasarrufunun ülkelerin enerji bütçelerine çok önemli bir katkı sağlayacağı açıktır.

Halen ülkemizde üretilen enerjinin % 92’ si konut, sanayi ve ulaşım sektörlerinde kullanılmaktadır. Yapı sektöründe enerji tüketimi 20 milyon TEP (taşkömürü eşdeğeri petrol) değerine ulaşmıştır. Yine ülkemizde ısıtma amaçlı enerji tüketimindeki savurganlık 6 TEP’ ye ulaşmıştır. Bu açıdan olaya bakılacak olursa, yapılarda konfor düzeyini düşürmeden, enerji kaybının azaltılması gereği ortaya çıkmaktadır. Yapılarda üretilen ısı enerjisinin korunması ve yapıda iç hava kalitesinin sağlanması, uygun yapı malzemeleri, yapı bileşenleri, yapı katmanlarının yanı sıra ısıtma ve soğutma son teknolojilerinin kullanılmasıyla olacaktır.

Enerji kaynaklarını sınırlı ve pahalı olduğu günümüzde enerjinin elde edilmesi yanında bilinçli kullanımı da önemlidir. Enerjiyi bilinçli diğer deyişle verimli kullanmanın geçerli bir yolu iyi bir yalıtım sistemi oluşturmaktır. Ülkemizde tüketilen toplam enerjinin % 35’ ine yakınının konut ısıtılmasında kullanıldığı; ve enerji kaybının 3 milyar dolar olduğu düşünülürse yalıtımın dolayısıyla yalıtım malzemesinin önemi ortaya çıkmaktadır.

Yapı endüstrisinde ısı ve ses yalıtımı yüksek, ısıya dayanıklı, hafif ve yüksek basınç dayanımlı malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca bu malzemenin dekoratif özellikte de olması arzu edilen bir özelliğidir. Bu tür malzeme yapı endüstrisinde özellikle de konut yapımında yaygın bir kullanım alanı bulacaktır.

Yaptığımız ön araştırmalar sonucunda sözü edilen özellikleri taşıyabilen hafif yapı malzemesinin, doğal zeolitlerden üretilebileceği saptanmıştır. Zeolit, geniş anlamındaki tanımıyla alkali ve toprak alkali katyonları ihtiva eden sulu alümina silikat olarak tanımlanır.

Doğal zeolitler yaygın kullanım alanlarının varlığı ve büyük pazar potansiyeline rağmen, bir çok pazar alanında daha yeni yeni kabul görmeye başlamıştır. Doğal zeolitler tabiatta büyük rezervler halinde bulunur, işletilmesi diğer madenlere göre daha kolay ve ucuzdur.

Zeolitlerin endüstriyel alanlarda kullanılabildeği 1940' lı yıllar ortaya konulmasına rağmen tali mineral olarak volkanik kayaların boşluk ve çatlaklarında bulunduğunun bilinmesi kullanımlarını sınırlamıştır. Ancak 1950' li yıllardan sonra denizel ve gölssel tüflerin de zeolit içerdiklerinin saptanmasıyla kullanım alanları hızla genişlemiştir.

Ülkemizde ilk defa 1971 yılında Gölpazarı-Göynük civarında doğal zeolit çeşitlerinden analsim oluşumları saptanmıştır. Daha sonra Ankara'nın batısında analsim ve yine doğal zeolit çeşitlerinden olan klinoptilolit yatakları bulunmuştur. Volkana tortul oluşumlarının gözlenebildiği ülkemizde daha çok klinoptilolit ve analsim türü doğal zeolitler yoğunlukta bulunmaktadır.

Türkiye' de detaylı etüdü yapılmış tek zeolit sahası Manisa-Gördes civarındaki M.T.A ruhsatlı sahadır. Sahada 18 milyon ton görünür zeolit rezervi ve 20 milyon ton zeolitik tüf rezervi tespit edilmiştir. Balıkesir-Bigadiç bölgesinde ise Türkiye' nin en önemli zeolit yatakları tespit edilmiş olup, kolaylıkla işletilebilir nitelikte yaklaşık 500 milyon ton rezerv tahmin edilmektedir. Ülkemiz genelinde toplam rezervin de 50 milyar ton civarında bulunduğu tahmin edilmektedir (Çetinel 1996).

Türkiye' de zeolit tüketimi ithal yoluyla karşılanmaktadır. Ancak Bigadiç ve Lalapaşa yörelerinde üretilen zeolitik tüfler, tras olarak çimento fabrikalarında kullanılmaktadır. Yapı taşı ve başka amaçlı zeolit tüf kullanımı henüz Türkiye' de yapılmamaktadır.

Türkiye' deki yatakların büyüklüğü ve kalitesine rağmen işletilebilirliği ve kullanım alanları üzerindeki bilgilerin azlığı, zeolit kaynaklarının değerlendirilmesine engel olmaktadır. Dünyada doğal zeolitlerin kullanımı ve

üretimi hızla gelişmekte ise de ülkemizde bu zamana kadar, zeolit üretimi yapılmamıştır. Pilot çapta ürün kullanımı belirleme çalışmaları için küçük üretimler yapılmaktadır. Ancak Etibank Bigadiç Kolemanit İşletmesi'nde, alttaki boratlı birimler üzerinde örtü tabakası olarak bulunan zeolitli üst tüfler, üretimi yapan müteahhit firma tarafından dekapaj yapılırken alınmaktadır. Miktarı hakkında kesin bilgi bulunmamasıyla birlikte, üretici şirket tarafından rödevans karşılığı alınan bu malzeme, Balıkesir ve Söke çimento fabrikalarına KDV hariç 3-4 \$/ton FOB olarak satılmaktadır (Çetinel 1996).

Zeolitik tüf yatakları birçok ülkede puzzolonik hammadde olarak kullanılmaktadır. Zeolit puzzolanları, son beton ürününün daima yeraltı su korozyonuna maruz kalacağı hidrolik çimentolarda, önemli uygulamalar bulmaktadır. Zeolitlerin sulu altyapılarda kullanılacak puzzolan çimento üretiminde kullanılması, yüksek silis içermeleri nedeniyle, betonun katılaşma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesini sağlayabilmektedir.

Perlit ve diğer volkanik camlar gibi doğal zeolitlerde genişlemeye uygundur. Genleştirilmiş doğal zeolitlerin sıkışma ve aşınmaya karşı dayanımı daha yüksek olup, genleştirilmiş hafif agregat üretilmektedir.

Zeolitik tüfler, düşük ağırlıklı, yüksek gözenekli, homojen, sıkı-sağlam yapıdadırlar. Kolayca kesilip işlenebilmeleri ve hafiflikleri ile iyi bir yapı taşı olarak kullanılabilirler. Birçok ülkede uzun yıllar bu amaçla kullanılan devitrifiye volkanik küller ve değişime uğramış tüflerin zeolit içerikli olduğu son yıllarda anlaşılmıştır.

Doğal zeolitlerden elde edilen hafif yapı malzemelerinin kullanılmasıyla, yapı ağırlıklarının azaltılması sonucu, deprem güvenliğinin artması da sağlanacaktır. Bu malzemelerin hafif olması yapıların taşıyıcı sistemlerinde ekonomi sağlandığı gibi, deprem yüklerine karşı güvenliği de arttırmaktadır.

Giderek artan enerji giderleri, dikkatleri ısıtma ve soğutma harcamalarına çektiğçe, bu konudaki bilinçlenme hızlanmıştır. Pek çok ülke, yapılarda ısı yalıtımının belirli yasa ve yönetmeliklerle denetim altına alınması zorunluluğunu duymuştur. Ülkemizde de Ocak 1985' de yayınlanan İmar Yönetmeliği ve Nisan 1985' de yayınlanan "TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı" geleneksel malzemeler yerine kullanımı özendirici maddeler getirmiştir. Doğal

zeolitler kullanılmasıyla elde edilen hafif yapı malzemeleri, yüksek ısı yalıtım özelliği ile, ısıtma ve soğutma sistemlerinin hem ilk yatırımlarında hem de yapıların kullanımları süresince ortaya çıkan enerji harcamalarında önemli tasarruflar sağlayacaktır. Bu malzemelerin istenilen boyutlarda üretilebilmesi, ahşap gibi kolayca işlenebilmesi, delme ve oyma işlemlerinin çok kolay gerçekleşebilmesi, milimetrik duyarlıktaki boyutları nedeniyle düzgün derzler elde edilmesi, sıva işlemlerinin en az kalınlıklara indirilmesi mümkündür. Bütün bunların sonucunda elde edilen düzgün yüzeyler nedeniyle bu malzemelerin üretilmesi, yapımcılara çağdaş teknolojinin üstün özelliklerini sunacaktır.

Doğal zeolitlerden yapılan hafif yapı malzemelerinin, taşıma ve işçilik giderlerinde önemli tasarruf sağlayacağı bir gerçektir. Bu malzemeler ile yapılan yapının ağırlığı azalacak ve deprem güvenliği artacaktır. Bu malzemelerden yapılan blokların düzgün yüzeyli ve düzgün kenarlı olması, duvarların sıvasız bırakılmasına veya sadece ince sıva ile sıvanmasına olanak verecektir. Bu malzemelerin çeşitli yüksek dayanım gücüne sahip türde üretilmeleri mümkündür. Bu malzemeler yüksek düzeyde ısı yalıtım özelliğine sahiptirler. Doğal zeolitlerin özelliklerinden dolayı bu malzemeler, iklim ve çevre koşullarından etkilenmez. Dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Bu malzemelerin hafifliği nedeniyle, büyük boyutlarda üretilmesi mümkündür. Büyük boyutlu ve düzgün yüzeyli bloklarla duvar örülmesi özel bir beceri gerektirmez. Ahşap gibi kesilebilir, delinebilir, tesisat kanalları açılabilir. Bu özellikleri ile yapımı hızlandırır, malzeme israfını ortadan kaldırır. Doğal zeolitlerden yapılan bu yapı malzemelerinin ateşe dayanıklı olması yangın güvenliğini artırır ve yangından korunmuş mekanların yaratılmasını sağlar.

Bu çalışmada Manisa-Gördes yöresi ve Balıkesir-Bigadiç yöresine ait, içinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunan zeolitik tüf örnekleriyle deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda Manisa-Gördes bölgesine ait ve içinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunan zeolitik tüflerden üretilen, "Anafom" adını verdiğimiz malzemenin, hafif yapı endüstrisinde kullanımının daha uygun olduğu saptanmıştır.

## 2. ZEOLİTLER

### 2.1. Giriş

“Zeolit” doğal yada yapay olmak üzere atomik düzeyde gözenekli yapıya sahip sulu alümina silikat bileşiklerine verilen isimdir. İlk olarak İsveç’ li mineralog Fredrick Cronstedt tarafından 1756 yılında bulunmuştur. Bu kristaller ısıtıldıklarında yapılarında bulunan suyun köpürmesinden dolayı Yunanca kaynayan taş anlamına gelen “zeolit” adını almıştır.

Minerologlar, zeolit kristallerini iki yüzyıl boyunca yerbilimleri açısından önemi olmayan, volkanik kayaların kovuklarında yer alan aksesuar mineral olarak görmüşlerdir. Zeolitler üzerinde ilk deneysel çalışmalar 1857 yılında A. Domour tarafından yapılan zeolitlerin su atma tersinirliği ile 1858 yılında E. Erchorn’ un gerçekleştirdiği iyon değişim özelliklerinin incelenmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, iyon değişim özelliği gösteren tüm alümina silikatlar zeolit olarak tanımlanmıştır. Yanlış tanımlama x ışınları kırınımı, IR absorpsiyonu, NMR, ESR gibi analiz yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte kristal yapılarının tayin edilmesine kadar sürmüştür.

G.Friedel, 1896 yılında zeolitler üzerinde bazı gazların ve alkolün adsorplandığını göstermiştir. 1925 yılında Wiegel ve Steinhoff, suyu uçurulmuş zeolitlerin küçük organik molekülleri adsorpladıklarını, büyük molekülleri ise bünyelerine kabul etmediklerini bulurlar. Zeolitlerin gaz moleküllerine karşı bir elek gibi davranmasından dolayı 1932 yılında McBain tarafından “moleküler elek” olarak adlandırılmıştır. Şabazit ise moleküler elek olarak kullanılan ilk doğal zeolit türüdür.

Endüstriyel alanda etkin bir şekilde kullanımı olan zeolitlerin volkanik kayaların kovuklarında sınırlı miktarda bulunması, bilim adamlarını yapay zeolit üretme metotlarını bulmaya yöneltmiştir. İlk sentezleme çalışmaları İngiltere’ de Barrer ve A.B.D.’ de Union Carbide firması tarafından başlatılmış, aynı anda doğada da doğal zeolit arama çalışmaları hızlandırılmıştır. 18. yüzyılın ikinci yarısından bu yana sürdürülen araştırmalar sonucu doğada yaklaşık 39 tür zeolit kristali bulunmuştur ve son 35 yıl içinde laboratuvarlarda 150’ nin üzerinde zeolit sentezlenmiştir. Bugün A.B.D., İtalya, Japonya ve Yeni Zelanda başta olmak üzere Türkiye ve Kanada’ da zengin ve saf doğal zeolit rezervlerinin bulunduğu

bilinmektedir. Doğal zeolitlerin en yaygın olanları eriyonit, mordenit, şabazit ve klinoptilolit türleridir. Ülkemizde ise genel olarak gözlenen doğal zeolit türü klinoptilolit ve analsim olup, diğer doğal zeolit türlerine çok az rastlanmıştır. Türkiye' nin en önemli zeolit yatakları detaylı etüdü yapılmış olan Balıkesir-Bigadiç yöresinde bulunmakta olup, 500 milyon tonluk bir rezerve sahiptir. Manisa-Gördes sahası ise yaklaşık 20 milyon ton olduğu tahmin edilen rezervi ile ikinci büyük zeolit yatakları olarak bilinmektedir. Türkiye genelindeki zeolit rezervinin ise yaklaşık 50 milyar ton olduğu ileri sürülmektedir.

Araştırmacılar 1950 yılına kadar zeolitlerin susuzlaştırma, adsorpsiyon ve iyon değişimi özelliklerini ortaya çıkarmak amacı ile farklı nitelikte deneyler yapmışlardır. Özellikle şabazit ve mordenit türü zeolitlerin ilginç adsorplama özelliklerinin olduğunu ve bazı gazları çok iyi adsorpladıklarını görmüşlerdir (Yörükoğulları 1993, Dikmen 1998).

## 2.2. Zeolitlerin Temel Yapıları ve Özellikleri

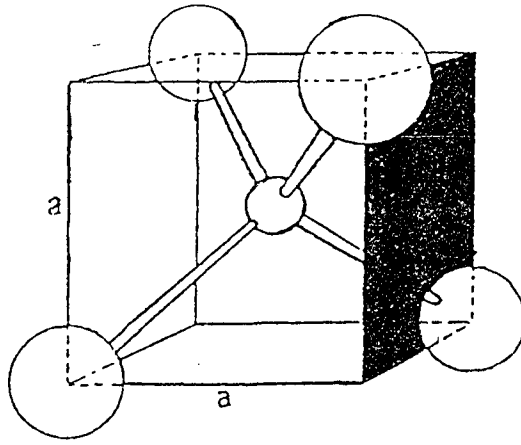
Zeolitler alkali ve toprak alkali elementlerin kristal yapıya sahip, sulu alüminyum silikatlarıdır. Genel olarak kristalografik birim hücre için yapısal formülü;



şeklinindedir. Burada  $M^+$ ;  $Na^+$  yada  $K^+$  gibi tek değerli bir katyon,  $M^{++}$  ise  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Ba^{++}$  gibi tek değerli bir katyondur.  $SiO_2/AlO_2$  mol oranı ( $y/x$ ) zeolit türüne bağlı olarak 1 ile 5 arasında değişir.

Herhangi bir zeolit kristalinin en küçük yapı birimi  $SiO_4$  ya da  $AlO_4$  dörtyüzlüsüdür. Bu dörtyüzlünün merkezinde, oksijen iyonundan çok daha küçük olan silisyum ya da alüminyum iyonu ve dört köşesinde de tetrahedra oksijen iyonları bulunur (Şekil 2.1). Silisyum iyonu (+4), alüminyum iyonu (+3) ve oksijen iyonu (-2) değerlikli olduğundan, bir silisyum iyonu kendini çevreleyen dört oksijen iyonunun ancak (-4) değerliğini karşılar. Böylece her oksijen iyonunun (-1) değerliği kalır ve başka bir silisyum iyonu ile birleşebilir. Silisyum iyonun yerini alüminyum iyonunun alması sonucu dörtyüzlülerin elektrik yükü-

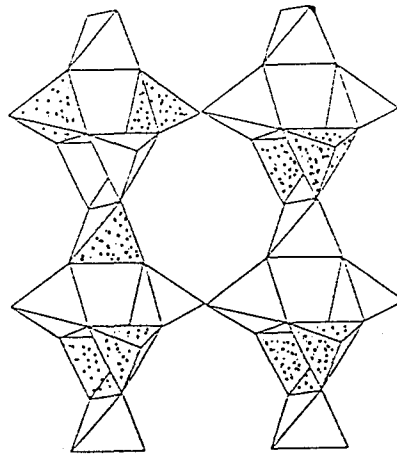




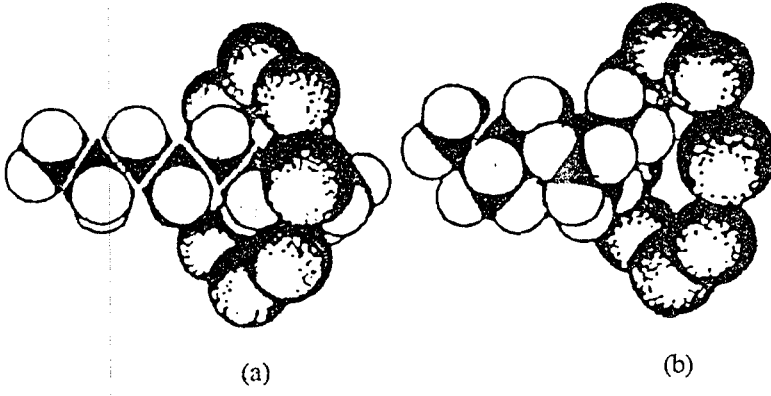
Şekil 2.1.  $\text{Si}^{4+}$  veya  $\text{Al}^{3+}$  iyonunun  $\text{O}^{2-}$  iyonları tarafından çevrelenerek oluşturduğu dörtyüzlü  $\text{O-O}=\text{a}\sqrt{2}$ ,  $\text{Si-O}=\text{a}\sqrt{3}/2$  (Dyer 1988)

nün dengelenmesi için ek bir (+1) yüküne ihtiyaç vardır. Bu (+1) yükü  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  gibi değişebilir katyonlarca sağlanır. Dörtyüzlülerin bu şekilde birleşmesiyle bir zincir oluşur. Bu zincirler birbirine aradaki  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  ve  $\text{K}^+$  iyonlarıyla bağlanarak, ortası kanal gibi açık olan, bal peteği görümlü üç boyutlu bir kristal yapı oluşturur (Şekil 2.2).

Zeolitlerin en önemli karakteristik özellikleri, yapısındaki kanallarda su molekülleri içermeleridir. Bu su moleküllerinin, hem katyonlara hem de silikat yapısına sıkı bağlı olduğu zeolitlerde, kristal yapısında herhangi bir değişme olmaksızın, su kaybı yüksek sıcaklıklarda gerçekleşirken, büyük boşluklu bazı zeolitlerde yüzeye tutunan su, düşük sıcaklıklarda zeoliti terkeder. Susuzlaştırma (dehidrasyon) adı verilen bu işlem sonucunda zeolitin kristal yapısı bir, iki ve üç boyutlu kanallara ve çok geniş bir yüzey alanına sahip olur.



Şekil 2.2. Zeolit yapısı oluşturan dörtyüzlülerin zincir bağlanmaları (Dyer 1988)



Şekil 2.3. a) Kanallara, doğrusal zincir hidrokarbonların girişi  
b) Büyük bir zincir hidrokarbonun tutulması (Orhun 1997)

Zeolit 100-350°C aralığında birkaç saat ısıtıldığında kanallardan geçebilecek büyüklükteki su ( $H_2O$ ), amonyak ( $NH_3$ ), civa buharı ( $Hg$ ) vb. moleküller, susuzlaşmış kanal ve gözenek yüzeylerinde tutunur. Kanalları geçemeyecek büyüklükte çapa sahip moleküller ise zeolite giremezler. Zeolitler, bu özelliklerden dolayı “moleküler elekler” olarak adlandırılırlar. Şekil 2.3’ te 4,5 Å çaplı gözeneklere sahip CaA tipi sentetik zeolitin kanallarından birine pentan gibi 4,3 Å çaplı hidrokarbon girebilmekte, 5 Å çaplı izopentan ise girememektedir.

Zeolitlerin, alümina silikat anyon çatısında tutulan katyonların, temasta olduğu çözeltideki iyonlarla yer değişimine olanak sağlaması özelliği, farklı nedenlerle yoğun şekilde incelenmektedir. İyon değişimi yoluyla, katyonların girişinden, ana zeolitin gözenek çapının değiştirilmesinde yararlanıldığı zeolit modifikasyonu konusu oldukça ilgi çekmektedir. Örneğin Zeolit A’ nın gözenek çapı yaklaşık 5 Å’ dur. Zeolit A’ nın sodyum katyonuyla iyon değişimi yapması durumunda sodyum katyonları pencere yakınlarında yer alarak pencere boyutunu 4 Å’ a indirirler. Bu tür zeolitlere “modifiye zeolitler” denir. İyon değişim yoluyla gözenek veya pencere boyutlarının değişimi olanağının yanı sıra, gözeneklere yerleşen katyonların türü, sayısı ve yerleri gözenek içindeki yük dağılımını etkiler. Bu durum adsorplama özelliklerini de değiştirecektir. İyon değişimi işlemleriyle ilgili çalışmalar, zeolitlerin endüstrideki kullanım alanlarını artırmaktadır.

Doğal zeolitlerin oluşumu hakkında çeşitli görüşler vardır. 1950 yılına kadar zeolitlerin volkanik kayaların içerisinde oluştuğu görüşü vardı. Daha sonra zeolitlerin düşük dereceli başkalaşım ve genç yaşlı tortul kayaların oluşmasından sonra alümina silikatların gözenek suyu ile tepkimesi sonucu oluştuğu görüşüne varıldı. Volkanik camların çoğu, doğal zeolitlerin oluşumu için gerekli alümina

silikat ortamlarıdır. Bunun dışında kil mineralleri feldspatlar, Al-Si jelleri de uygun koşullarda zeolitlere dönüşebilirler (Ünaldı 1995, Orhun 1997, Dikmen 1998).

## 2.3. Doğal Zeolitler

### 2.3.1. Doğal zeolitlerin özellikleri

Zeolitler, düşük kısmi basınçlarda bile yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahiptirler. Bu durum toplam hacimlerinin % 50' sini boşlukların ve toplam yüzey alanlarının yaklaşık % 90' ını geniş iç yüzey alanları ( $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ ) oluşturmasıyla açıklanabilir. Ayrıca uniform gözenek boyutları ve seçicilik özelliği nedeniyle diğer ticari adsorplayıcılar (aktif alüminyum, silika jel, aktif karbon...) arasında en önemli yeri tutmaktadır. Silika jel ve aktif karbon gibi adsorplayıcıların gözenek boyutları  $10 \text{ \AA}$  ile  $100 \text{ \AA}$  gibi çok geniş aralıkta değişirken zeolitin kristal yapısına bağlı olarak  $3 \text{ \AA}$  ile  $10 \text{ \AA}$  arasında tek bir kanal çapına sahiptir (Ülkü ve Turgut 1991, Dikmen 1998).

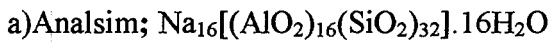
Zeolitlerin başka bir önemli özellikleri de diğer adsorplayıcılara kıyasla adsorpsiyon kapasitelerinin sıcaklıkla fazla değişmemesi nedeniyle yüksek sıcaklıklarda bile önemli adsorpsiyon kapasitelerine sahip olmalarıdır. Zeolitlerdeki  $\text{SiO}_2/\text{AlO}_2$  mol oranının yüksek olması onların ısıya karşı dayanıklı olduklarını göstermektedir. Zeolitler yapılarında bulunan suyu  $150\text{-}200^\circ\text{C}$ ' de, kristal suyunu ise yaklaşık  $700^\circ\text{C}$ ' de atabilmektedir. Aynı zamanda asit ile muamele edildiklerinde iç gözeneklerinin büyümesi yanı sıra gözenekler daha homojen bir şekil alabilirler (Orhun ve Yörükoğulları 1991, Dikmen 1998).

### 2.3.2. Önemli doğal zeolit türleri

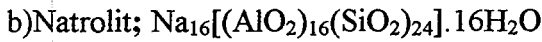
Zeolitler genel olarak yapısal özelliklerine göre yedi gruba ayrılır. Bu zeolit grupları analsim, natrolit, şabazit, filipsit, heulandit, mordenit, fojasit' tir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Zeolitlerin sınıflandırılması (Tsitsishvili 1992)

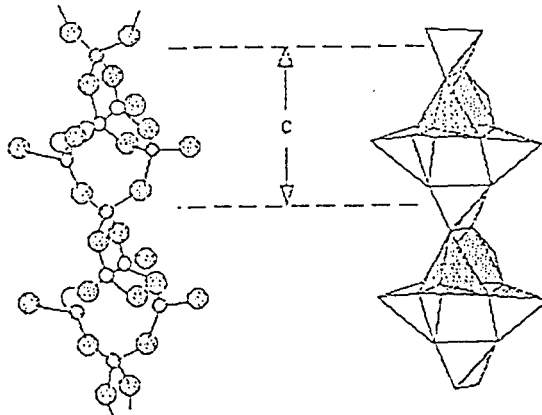
Zeolit grubu	Zeolitler
Analsim	Analsim, Lömandit
Natrolit	Natrolit, Tetranatrolit, Mesolit, Tomsonit, Edingtonit
Şabazit	Şabazit, Omelitit, Eriyonit, Ofredit, Gmelinit
Filipsit	Filipsit, Harmotom, Garronit, Gismandit
Heulandit	Heulandit, Klinoptilolit, Stilbit
Mordenit	Mordenit, Ferriyerit, Deshiartit
Fojasit	Fojasit, Linde A



Cam parlaklığında, renksiz, genellikle kristal biçiminde bir mineraldir. Kristal sistemi kübiktir. Küflü kum taşlarının metamorfizmasının ilk evresinde oluşur. Analsimin % 14,1' ini  $\text{Na}_2\text{O}$ , % 23,2' sini  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , % 54,5' ini  $\text{SiO}_2$  ve % 8,2' sini  $\text{H}_2\text{O}$  oluşturur. Sertliği 5-5,5, yoğunluğu  $2,25 \text{ g/cm}^3$  ve kırılma indisi 1,48-1,49' dur. Kristal özgül ağırlığı  $1,85 \text{ g/cm}^3$  olan analsimin kanal genişliği  $2,6 \text{ \AA}$  ve  $\text{Si/Al} = 1,63'$  dür. Kalsiyumca zengin analsim türü dehidratlandığında oda sıcaklığında argon, azot, metan ve etan gibi molekülleri kolay adsorplar (Gottardi and Galli 1985, Dyer 1988, Dikmen 1998).



$(\text{Si,Al})\text{O}_4$  dörtyüzlülerinden oluşan dörtlü halka serbest uçlar paylaşarak başka bir  $(\text{SiO}_4)$  veya  $(\text{AlO}_4)$  dörtyüzlüsü ile diğer bir halkaya bağlanır. Böylece C eksenine paralel sürekli bir zincir oluşur (Şekil 2.4).

Şekil 2.4. Natrolit yapısında görülen  $(\text{Si,Al})$  dörtyüzlülerin oluşturduğu zincir yapı

Kristal sistemi ortorombik, yoğunluğu  $2,23 \text{ g/cm}^3$  ve Si/Al oranı 1,44-1,58 arasındadır. Sodyumca zengin bir yapıya sahip olmasına rağmen bazen yapısında  $\text{Ca}^{2+}$  ve  $\text{K}^+$  iyonları bulunabilir.

Kristal özgül ağırlığı  $1,76 \text{ g/cm}^3$  olup 8 halkalı kanalların genişliği  $(2,6 \times 3,9) \text{ \AA}$  dur. Adsorplayabileceği en büyük molekül amonyak ( $\text{NH}_3$ ) molekülüdür. Toplam boşluk hacmi % 22, kinetik çapı  $\sigma = 2,6 \text{ \AA}$  dur (Dyer 1988, Tsitsishvili 1992, Dikmen 1998).

c)Şabazit;  $\text{Ca}_2[(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_8] \cdot 13\text{H}_2\text{O}$

Kristal sistemi rombohedraldir. Sertliği 4-5, yoğunluğu  $2,05-2,10 \text{ g/cm}^3$ , 8 halkalı kanal genişliği  $(3,7 \times 4,2) \text{ \AA}$  ve 6 halkalı kanal genişliği  $2,6 \text{ \AA}$  dur. Kristal boşluğu % 47, Si/Al oranı 1,6-3 arasındadır. Isıya oldukça dayanıklı bir zeolit mineralidir. % 47  $\text{SiO}_2$ , % 20  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , % 5  $\text{CaO}$ , %  $\text{N}_2\text{O}$  ve % 21  $\text{H}_2\text{O}$  dan oluşur. Stabil bir yapıya sahip olan şabazit diğer doğal zeolitlere göre daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahiptir. Genelde  $\text{Ca}^{++}$  iyonları içeren yapı, bazen  $\text{Na}^+$  ve  $\text{K}^+$  içerebilir (Gottardi and Galli 1985, Dyer 1988, Dikmen 1998).

d)Filipsit;  $(\text{Ca}, \text{K}_2, \text{Na}_2)_5[(\text{AlO}_2)_{10}(\text{SiO}_2)_{22}] \cdot 20\text{H}_2\text{O}$

Kristal sistemi ortorombik, yoğunluğu  $2,15 \text{ g/cm}^3$  olan filipsit türünün Si/Al oranı 1,7-2,4 arasındadır. Toplam boşluk hacmi % 30 olup kristal özgül ağırlığı  $1,58 \text{ g/cm}^3$  dür. Kristal yapısı  $200^\circ\text{C}$ ' nin üzerinde bozulabilir. Adsorplayabileceği en büyük molekül su ( $\text{H}_2\text{O}$ ) molekülüdür. Bu yapının kinetik çapı  $\sigma = 2,6 \text{ \AA}$ , toplam boşluk hacmi % 30' dur (Dyer 1988, Tsitsishvili 1992, Dikmen 1998).

e)Heulandit;  $\text{Ca}[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{28}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$

Zeolit olarak ilk defa tanımlanan bir mineraldir. Doğada çok geniş bir alana dağılmış zeolit grubudur. Bir çok ülkede geniş rezervlerinin bulunması ve önemli özelliklere sahip olması, araştırmalarda tercih sebebi olmaktadır.

Heulandit kristal yapısı monoklinik, 8 halkalı kanal genişliği  $(4,0 \times 5,5) \text{ \AA}$  dur. 10 halkalı yapıda bu değer  $(4,4 \times 7,2) \text{ \AA}$  a çıkar. Sertliği 3.5-4, yoğunluğu  $2,18 \text{ g/cm}^3$  ile  $2,2 \text{ g/cm}^3$  arasındadır. Camsı bir görünümü vardır. Renksiz veya sarı, kırmızı renklerde olabilir. % 9,2  $\text{CaO}$ , % 16,8  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , % 59,2  $\text{SiO}_2$ , % 14,8  $\text{H}_2\text{O}$  un bileşiminden oluşur.  $\text{H}_2\text{O}$  molekülleri bakımından zengin olan mineralde su miktarı 30 mol' e kadar çıkabilir. Kristal özgül ağırlığı  $1,69 \text{ g/cm}^3$ ,

kinetik çapı  $\sigma = 2,6 \text{ \AA}$  dır. Eğer  $130^\circ\text{C}$ ' de dehidratlanırsa, adsorplayabileceği en büyük molekül  $\text{NH}_3$ ' tür (Dyer 1988, Tsitsishvili 1992, Dikmen 1998).

f)Mordenit;  $\text{Na}_8[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{40}].24\text{H}_2\text{O}$

Kristal yapısı ortorombiktir. Kristal yoğunluğu  $2,13 \text{ g/cm}^3$  olan mineralin, % 28' lik bir kristal boşluğu vardır. 8 halkalı yapının kanal genişliği  $6,7-7,8 \text{ \AA}$  dur. Si/Al oranı  $4,17-5,0$ ' dır. Oldukça kararlı bir yapısı vardır. Adsorplayabileceği en büyük molekül  $\text{C}_2\text{H}_4$ ' tür. Havanın oksijence zenginleştirilmesinde endüstriyel alanda önemli bir yeri vardır (Dikmen 1998).

g)Fojasit;  $(\text{Na}_2, \text{Ca}, \text{Mg}, \text{K}_2)\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Kübik yapıya sahip, yoğunluğu  $1,91 \text{ g/cm}^3$  tür. 12 halkalı kanal genişliği  $7,4 \text{ \AA}$ , kristal özgül ağırlığı  $1,27 \text{ g/cm}^3$  tür. Oldukça kararlı yapısı olan mineralin adsorplayacağı en büyük molekülün  $(\text{C}_2\text{F}_5)_3\text{N}$  olduğu bilinmektedir (Dikmen 1998).

### 2.3.3. Doğal zeolitlerin bazı kullanım alanları

Doğal zeolitler madencilik, metalurji, kağıt endüstrisi, sağlık, inşaat gibi sektörlerde de kullanım alanı bulmuşlardır.

#### 2.3.3.1. Madencilik sektörü

Doğal zeolitler madencilik sektöründe maden yataklarının aranmasında kullanılmaktadır. Tüflü kum taşlarındaki uranyum cevherleşmesinin doğal zeolitlerden klinoptilolit-heulanditli seviyelere bağımlı olduğu belirlenmiştir (Çetinel 1993).

#### 2.3.3.2. Metalurji sektörü

Pirometalurji sanayisinde  $\text{CaCO}_3$  ve doğal zeolit karışımı; Cu-Pb alaşımlarının eritilmesinde ortaya çıkan dumanları, % 90 oranında yok edebilmektedir (Çetinel 1993).

Madenlerden kaynaklanan asit drenajı metal iyonları içerir. Bu iyonlar arasında Pb ve Ni kolayca uzaklaşırken, Ca' un engellenmesine Zn, Mn, Cu ve Cd' un uzaklaştırılmasını güçleştirir (Pearson 1998).

### 2.3.3.3. Kağıt endüstrisi sektörü

Doğal zeolit cevherleri kağıt endüstrisinde dolgu malzemesi olarak kullanılır. Klasik kağıda göre daha hafif ve daha kolay kesilebilmektedir (Çetinel 1993).

Her yıl Japonya' da 3000 ton klinoptilolit iyi kalite beyaz kağıt yapımı için kullanılmaktadır. Zeolitlerin kağıt endüstrisinde tüketimlerinin artma eğiliminde oluşlarının nedeni, yerine kullanıldıkları kaolenden daha ucuz olmaları yanında üretilen kağıdın daha tıkmaz, mürekkebi daha az dağıtan ve daha kolay kesilen özellikte olmasıdır. Bu amaçla işletilen Japonya' daki yataklar 100 m kalınlıktadır ve 5 km<sup>2</sup>' lik bir alan kaplarlar. Yine Macaristan' ın Tokaj bölgesinde geniş alanlar kaplayan klinoptilolit yatakları da kağıt endüstrisinde kullanılmak üzere işletilmektedir. Ancak üretim Japonya' da ki kadar çok değildir (Sarız ve Nuhoglu 1992).

### 2.3.3.4. Sağlık sektörü

Doğal zeolitlerden klinoptilolitin florürlü diş macunlarında parlatıcı katkı maddesi olarak kullanıldığı bilinmektedir (Çetinel 1993).

### 2.3.3.5. İnşaat sektörü

Doğal zeolitlerin sulu altyapılarda kullanılacak puzzolan çimento üretiminde kullanılması, yüksek silis içermeleri nedeniyle betonun katılaşma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesini sağlayabilmektedir (Çetinel 1993).

İlk puzzolan çimentosu yol, su geçidi ve kamu binalarının yapılması için Napoli yakınlarındaki zeolitik tüfler kullanılarak İtalya tarafından üretilmiştir. Zeolitik puzzolan çimentoları sürekli su ile temas içinde olan yapılarda etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Zeolitik tüfler dünyanın bir çok yerinde içlerinde zeolit olduğu bilinmeden yalnız silis bileşimlerinden yararlanılmak amacıyla kullanılmaktadır. Yugoslavya, Bulgaristan ve Almanya' da büyük miktarlarda zeolitik tüf, puzzolan çimentosu üretimi için işletilmektedir.

Zeolitler 200 yıldan beri yapı taşı olarak kullanılmışlardır. Zeolitli tüflerin hafif oluşu kadar dayanıklı oluşları ve kolaylıkla kesilip işlenebilmeleri de yapı taşı olarak kullanılmalarının en önemli nedenleridir. Güney Meksika' da bir

çok binalar % 90 mordenit ve klinoptilolit içeren zeolitik tüflerden kesilmiş taşlardan yapılmışlardır. Aynı şekilde Japonya' nın Otsunomiyo kenti yakınlarında yüzlerce yıldır yapı taşı olarak işletilen zeolitler 100 metreden fazla kalınlığa sahiptirler. Bu yapı taşı olarak işletilen zeolitler, % 80-85 klinoptilolit yanında az miktarlarda montmorilonit, kaledonit ve volkanik cam içerirler. Orta İtalya' da ki ünlü Napoli kentinin hemen hemen tüm binaları büyük miktarlarda şabazit ve filipsit içeren sarı zeolit tüflerinden yapılmışlardır. Orta Avrupa' da ki bir çok büyük binalarda, Almanya' da ki Leacher bölgesindeki zeolitik tüflerden kesilmiş yapı taşları kullanılmıştır. Avrupa' da ki bir çok ülkede, zeolitlerin yapı endüstrisinde değişik biçimlerde kullanılma olanakları araştırılmaktadır. Klinoptilolit, perlit gibi, 1200-1400°C' ye kadar ısıtıldığında, içerdiği suyun ani olarak buhar fazına geçmesi ile genişmekte ve bu anda soğuma sağlanırsa hafif ve gözenekli bir silikat malzemesi oluşmaktadır. Böyle geliştirilmiş zeolitlerde yoğunluk 0,8 g/cm<sup>3</sup>' e kadar düşmekte, gözeneklilik de % 65' e kadar çıkabilmektedir (Sariz ve Nuhoglu 1992).

Genleştirilmiş doğal zeolitlerin sıkışma ve aşınmaya karşı dayanımı daha yüksek olup, geliştirilmiş hafif agregat üretilmektedir. Doğal zeolitik tüfler düşük ağırlıklı, yüksek gözenekli, homojen, sıkı-sağlam yapıdadırlar. Bu özelliklerinden dolayı hafif yapı taşı olarak yapı endüstrisinde kullanımları mümkündür (Çetinel 1993).

Bölüm 2.1' de belirtildiği gibi mevcut endüstriyel ihtiyaç için yaklaşık 150 türde zeolit üretilmiş, fakat doğal zeolitlerin de iyi bir ısıl kararlılığı sergilemesi ve ucuz oluşu nedeniyle kullanım alanları giderek artmaktadır (Dikmen 1998).

#### **2.3.4. Doğal zeolitlerin kullanımı ile yapılan yapı endüstrisindeki çalışmalar**

Gelişmiş ülkelerde doğal zeolitlerin yapı endüstrisinde kullanımı görülmektedir. Bu ülkelerin başında Rusya, Kanada, A.B.D, Japonya ve Belçika gelmektedir. Özellikle Rus bilim adamları doğal zeolitlerden yapı endüstrisinde, dekoratif süslemelerde kullanılması için çalışmalar yapmışlar ve bu çalışmaların sonuçlarını patent alarak hayata geçirmişlerdir.



Yıllardır Rusya’ da çağdaş makine ve inşaat endüstrisi ucuz, çevreye zararsız, inşaat ve yapılarda kullanılacak, blok ve taneli ve geniş ölçüde mekanik, kimyasal, akustik, özellikler taşıyan malzemelere çok ihtiyaç duyulmuştur.

Rusya’ da, Ural Dağları’ nın doğusunda 10 civarında büyük ekonomik ve sanayi değeri olan zeolit içeren yataklar bulunmuştur. Bunlar genellikle zeolit içeren volkanik tüflerdir. Tahmini rezerv 3 milyar ton civarındadır. Sibirya ve Dalniy Vostak bölgelerinde bulunan zeolit içeren yataklarının düzenli yayılmış olması, zeolit yerli hammaddeler kategorisine dahil edilmesini ve bölgesel ekonomik yapılanma çerçevesinde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Zeolit içeren bu maddeler kullanılarak birçok araştırma merkezlerinde, yeni teknolojiler bulunmaya çalışılmaktadır. Zeolit içeren malzemelerin değişik sanayi türlerinde, tarımda, ekolojik teknolojilerde kullanılabilirliği ortaya çıkarılmıştır. Jeo-kimya dalının geliştirilmesi için, yeraltı kaynaklarının üretime yönelmesi gerekmektedir. Sanayi bölgelerin sosyal ve ekonomik gelişmesi için, yeni inşaat malzemelerin üretimi büyük önem taşımaktadır. Zeolit içeren bu malzemelerin silikat tuğla yapımında da aktif katkı maddesi olarak kullanıldığı bilinmektedir.

Rusya İlimler Akademisi, Mineroloji ve Petrografi Enstitüsü’ nde yapılan çalışmalarda, doğal zeolitler kullanılarak yapı endüstrisinde kullanılmak üzere bazı malzemeler üretilmiştir. Zeolit içeren malzemelerin cam köpüğü türünden çok gözenekli yapı malzemesi olan sibeerfoam’ ın elde edilişi, buradaki araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir (Kazantseva, Belitsky et al 1995).

Sibeerfoam, sıkıştırılmaya (18 MPa’ a kadar) ve bükülmeye (6 MPa’ a kadar) karşı sağlam, az su emmesi olan (% 0.5-6.0), kapalı gözenekli ve inorganik maddelere has özelliklere sahiptir. Blok ve taneli olan sibeerfoam, zeolit içeren maddelerden elde edilir. Yeni bulunan teknolojinin en büyük özelliği, zeolit oranı % 50’ nin altında olan hammaddelerin kullanılabilirliğini öngörmesidir. Bu orana sahip hammaddelerin kullanılması yataklardan daha etkin faydalanmayı sağlar, karlılığı yükseltir ve toprak kaymalarının azalmasıyla da çevreye zararlılığı en aza indirir. Hammaddenin karışık olarak kullanılması, fabrikaların atıklarının azalmasını ve maliyetin düşürülmesini sağlamaktadır.

Blok siberfoam' ı elde etmek için genellikle "TOZ" metodu kullanılmaktadır. Zeolit içeren malzemeler 0.25-1.0 mm' ye kadar küçültülerek toz haline getirilir, gaz üreticisiyle karıştırılır, sıcağa dayanıklı kaplara konular ve 1140-1220°C' arası ısıtılarak köpüklendirilir (Kazantseva, Belitsky et al 1995).

Zeolitlerin minerolojik özellikleri, enerji sarfiyatını aza indiren yeni teknolojinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu teknolojiye malzemeleri küçültmek için fazla enerji sarfiyatı yapılmaz. Karışımın % 60' ını 0.25-1 mm boyutunda zeolit içeren hammadde, kalan % 40' ı ise gaz çıkaran madde ile karıştırılmış 1 mm boyutunda zeolit içeren hammadde oluşturmaktadır. Benzeri olmayan bu teknoloji hafif, orijinal süs ve inşaat malzemelerini elde etme olanağını sağlar. Zeolit içeren malzemeler aynı yatakta bile kimyasal,mineral içeriğine ve dokularına göre farklılıklar gösterirler. 1150-1200°C' de bu farklılıklar bazı zeolit içeren malzemelerde büyük dokulu olarak kendiliğinden köpüklenme gibi ortaya çıkmaktadır (Kazantseva, Belitsky et al 1997).

Siberfoam' un yapılmasında zeolitlerin 0.25-1 mm boyutunda olması ve siberfoam' un kimyasal ve mineral içeriğinin homojen olmaması renklerin birbirine kaymasını sağlar. Böylece siberfoam orijinal rengini alır. Siberfoam' ın aynı parçasında bile gözeneklerin rengi ve ölçüsü değişebilir. Zeolit içeren malzemelerin 0.25-1 mm boyutunda kullanılması ile elde edilen maddelerin yapımı, maddenin küçültülmesine harcanan enerjiyi azaltmakla kalmayıp, yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip, orijinal süs malzemesi ve hafif yapı malzemesi elde etme olanağını sağlamaktadır (Kazantseva, Belitsky et al 1995).

Doğal zeolitlerin yapı endüstrisinde uygulama bulması sadece Rusya ile sınırlı kalmamıştır. Kanada ve Japonya' nın yapmış olduğu ortak çalışmalarda, doğal zeolitlerin kullanılmasıyla hafif yapı malzemeleri yapımı ortaya çıkmıştır. Bu yapı malzemelerinin üretimi Rusya' da yapılan siberfoam' dan biraz daha farklıdır. Burada yapılan çalışmalara göre hafif beton üretiminde, duvar panellerinde, bloklarda, taban ve çatı kaplamalarında zeolit kullanımının uygunluğu görülmüştür. Uygulamaya bağlı olarak zeolit, yüzey aktivasyonunu mümkün kılan bir sıcaklıkta, kimyasal işleme tabi tutulmayabilir. Böylece zeolit, hem hava kabarcığı çıkaran malzeme hem de puzzolanik madde olarak kullanılacaktır (Fu, Ding et al 1996).

## 2.4. Silisyum Karbür (SiC)

### 2.4.1. Silisyum karbürün elde edilişi

Silisyum karbür son derece sert, çok yüksek mukavemete sahip, ısı geçirgenliği yüksek olan bir materyaldir. Endüstriyel silisyum karbür, silis kumu, kok, hızar tozu ve tuzun 2200-2500°C' de elektrik fırınında reaksiyona girmeleriyle elde edilir. Kullanılan karışımın yaklaşık olarak % 56' sını kum, % 35' ini kok, % 7' sini hızar tozu ve % 2' sini tuz oluşturmaktadır. Tuz, kum ve kok içindeki yabancı maddeleri temizlemeye yardım eder. Hızar tozu ise gazların kaçması için gerekli gözenekliliği sağlar. Elde edilen kristal malzeme parçalanıp öğütülür, asit demir manyetik olarak ayrılır ve eser olarak bulunan alkalide yıkanır ve kurutulur (Sümer 1988).

Silisyum karbür iki farklı yöntemle elde edilebilir. Birinci yöntem iki aşamalıdır.



İkinci yöntem de ise silisyum karbür oluşumu üç aşamalıdır.



Silisyum karbür oluşumu 1000°C' de başlar. Sıcaklık arttıkça özellikle 1600°C' den sonra reaksiyon hızlanır. Sıcaklığı 2300°C' ye çıkardığımızda silisyum karbür yapısında bozulma görülür ve silisyum karbür Si ve C elementlerine ayrılır (Budnikov 1964).

Silisyum karbürün fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Silisyum karbürün fiziksel ve kimyasal özellikleri (Onaran 1993)

Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	3,2
Basınç mukavemeti (MPa)	3x10 <sup>3</sup>
Eğme mukavemeti (MPa)	300-400
Erime sıcaklığı (°C)	2830
Kaynama sıcaklığı (°C)	2340
20-1000°C arası ısıl genişleme katsayısı (1/°C)	4,3x10 <sup>-6</sup>
400 °C' de ısıl iletkenliği (W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup> )	70
Sertliği (MPa m <sup>1/2</sup> )	4,8
Direnci (Ω cm <sup>-2</sup> )	0,5
Suda çözünürlük	Az
Asitte çözünürlük	Az
Alkalide çözünürlük	KOH ile

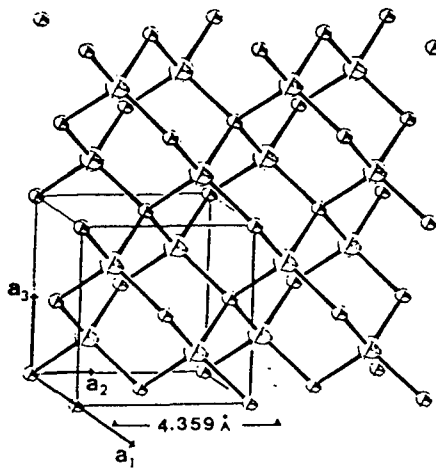
Silisyum karbürün sertliği yüksektir. Toz halindeki silisyum karbür, uygun bir metalle sinterlenerek sert kütle haline getirilebilir (Onaran 1993).

Silisyum karbürün yüksek ısı iletkenliği, boyutsal dengesi, kendisinin bir ateş kili bünyesinde veya özel refrakter malzemesi olarak kullanılmasını mümkün kılar. Kristalleştirme 2200-2350°C' de yapılır (Sümer 1993).

Diğer refrakter ürünlere göre silisyum karbürün, sıcakta yük dayanımının, parçalanma dayanımının ve aside karşı dayanımının çok yüksek, oksidasyon ve baza karşı dayanımının orta, sıcakta elektrik dayanımının ise çok düşük olduğu söylenebilir (Sümer 1994).

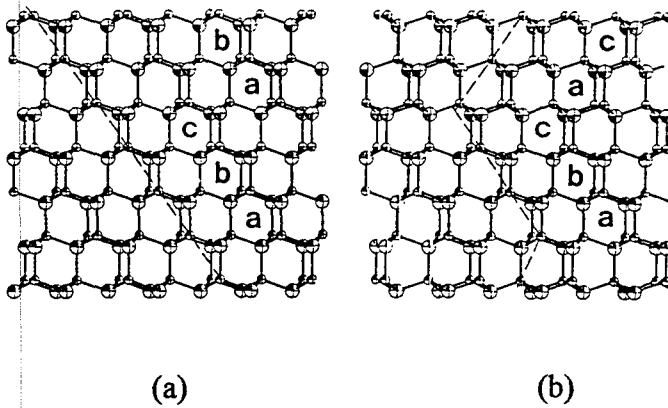
#### 2.4.2. Silisyum karbürün kristal yapısı

Silisyum karbür kristalleri periyodik tablonun IV. grup bileşikleridir. Şekil 2.5' te gösterildiği gibi silisyum karbür kristallerinde bir karbon atomu dört tane silisyum atomuna bağlanarak tetrahedral bir yapı oluşturur. Karbon ve silisyum atomları tetrahedral bir yapı oluşturacak şekilde birbirine bağlıdır. Bu tetrahedral yapılar üç boyutlu elmas örgü yapısını oluşturmak için aynı tepe noktasını paylaşırlar. Bu sağlam örgü silisyum karbürün yüksek dayanıklılığını ve



Şekil 2.5.  $\beta$ -SiC' ün kristal yapısı (Somıya, Inamata et al 1991)

yüksek sıcaklıklardaki kararlılığını sağlar. Silisyum karbürdeki, Si-C bağları bir tabaka oluşturur. Bu tabakaların üst üste düzenli bir şekilde yığılmasındaki farklılıklardan çok sayıda farklı tip meydana gelir. Bu tipler, kristal simetrisindeki farklılıklara göre iki gruba ayrılırlar. Bunlar;  $\alpha$ -SiC ve  $\beta$ -SiC' dür.  $\beta$ -SiC terimi kübik çinko alaşımly yapıya sahip kristaller için kullanılırken  $\alpha$ -SiC hekzanagonal ve rombohedral kristaller için genel bir terim olarak kullanılır. Siliyum karbürün özel kristal yapıları 3C, 4H, 6H, 15R, 9T, gibi gruplandırılır. Bu notasyonda sırasıyla C bir kübik sistemi, H hekzanagonal, R rombohedral ve T trigonal bir sistemi gösterir. Silisyum ve karbon atomları dört koordinasyonlu tetrahedral yapıyı oluştururlar ve üç boyutlu ağ yapıyı oluşturmak için tepe noktalarını paylaşırlar. Şekil 2.6' da SiC kristallerinde gözlenen özel yapılar gösterilmektedir.



Şekil 2.6. a)  $\beta$ - tipi : 3C SiC kristalinde gözlenen özel yapı

b)  $\alpha$ - tipi : 6H SiC kristalinde gözlenen özel yapı (Somıya, Inamata et al 1991)

Burada Si-C tabakalarının üst üste yığılması gösterilmektedir. Sonuç olarak kristalin fiziksel özellikleri yapının düzenlenmesine bağlı olarak değişir (Somiya, Inamata et al 1991).

Silisyum karbür 800°C' nin üzerinde oksitlenmeye başlar.1200°C' de O<sub>2</sub> ile reaksiyon verir. Bu reaksiyon denklemi;



şeklinde ifade edilebilir (Kazantseva, Belitsky et al 1995)

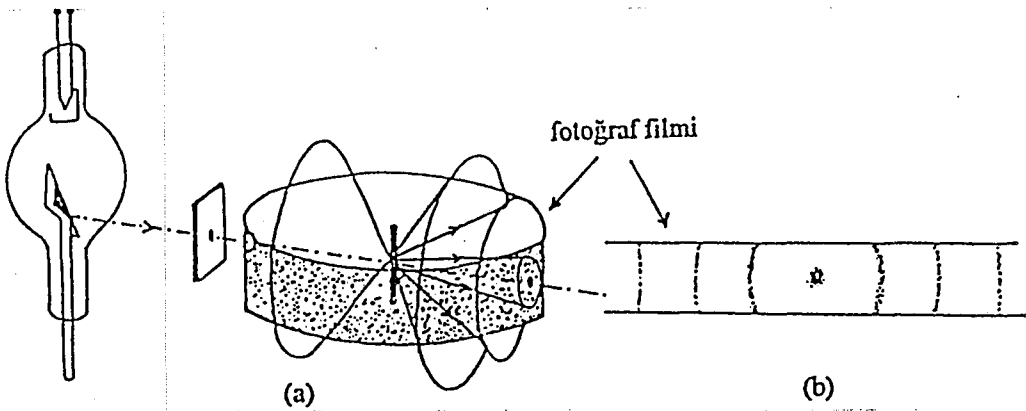
Deneyler sırasında ticari silisyum karbür ( $\alpha$ -SiC) kullanılmıştır. Ticari silisyum karbür ( $\alpha$ -SiC) yeşil ile siyah renklerde olup, hekzanagonal yapıdadır.

### 3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde deneysel yöntemler ve bunlara bağlı olarak yapılan deneylerde kullanılan araçlar hakkında bilgiler verilmiştir.

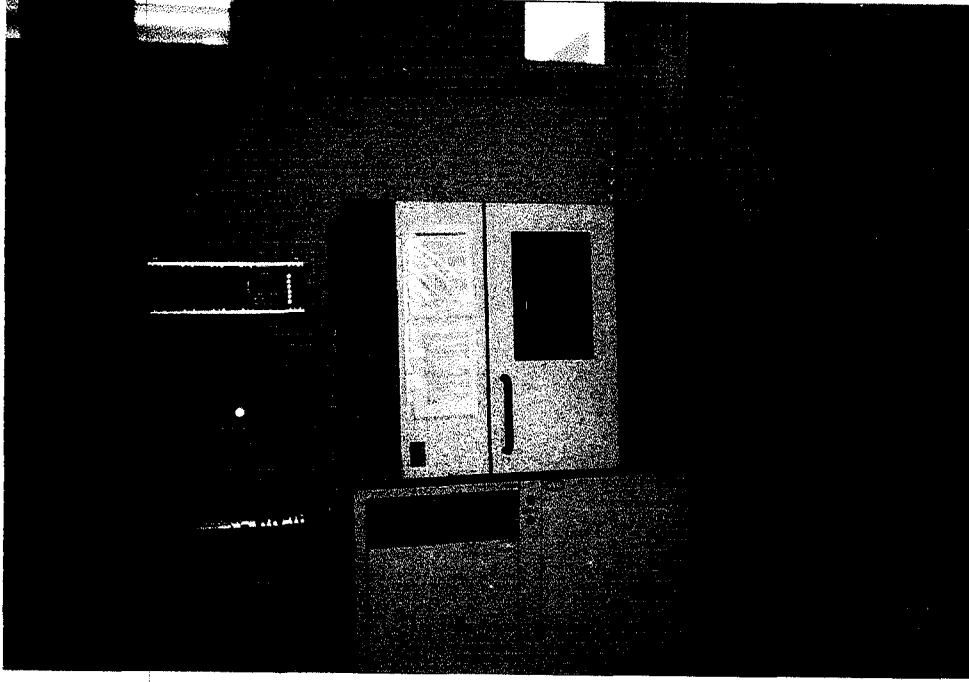
#### 3.1. X Işınları Kırınımının Toz Kristal Metodu

Debye, Scherrer ve Hull (1916) tarafından geliştirilen bu yöntemde, dar bir x ışınları demeti ince toz haline getirildikten sonra preslenmek suretiyle hazırlanmış çok kristalli bir levha üzerine gönderilmektedir (Şekil 3.1). Böyle bir sistemde gelişigüzel biçimde yönelmiş kristal parçacıklarından pek azı için Bragg koşulu sağlanabilir. Bragg koşulu  $\lambda$  dalgaboyu ve  $\theta$  geliş açısına bağlı olarak sağlanabilir.  $\lambda$  ve  $\theta$ 'ya bağlı olarak Bragg koşulunu sağlayan parçacıklar üzerindeki yansımalar sonucu, aletin yapısı ve mevcut silindirik simetri düzeninden dolayı film üzerinde, merkezde sıfırıncı mertebeden bir maksimum ve bunun etrafında merkeze uzaklıkları sırasıyla  $2\theta$ ,  $4\theta$ ,  $6\theta$ ,..., olan ve şiddetleri giderek azalan eş-merkezli daireler şeklindeki birinci, ikinci, üçüncü,..., mertebeden maksimumlardan oluşan karakteristik bir girişim deseninin meydana geldiği görülür. Daire yarıçaplarını ölçerek ve düzeneğin geometrik konumunu dikkate alarak deneyde kullanılan x ışınlarının dalgaboylarını veya kristal sabitlerini kolayca bulmak mümkündür (Gündüz 1988, Dikmen 1998).



Şekil 3.1. Toz kristalli x ışınları spektrometresi. (a) düzeneğin yapısı, (b) fotoğraf filmi üzerinde gözlenen girişim deseni

Deneyler sırasında kimyasal analizlerin tayininde ve numunelerin içlerindeki madde bulundurma oranlarının tespitinde Rigaku marka x-ray diffractometer kullanılmıştır. Bu cihazın fotoğrafı aşağıda görülmektedir.



Fotoğraf 3.1. X ışınları analiz cihazı

### 3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile büyük boyutlu numunelerin yüzeyini veya yüzeyine yakın bölgenin yapısı incelenir. Diğer mikroskobik sistemlere göre avantajları şunlardır.

Odak derinliği yüksektir, örneğin 1000 büyütmede optik mikroskobun odak derinliği  $0,1\mu\text{m}$  iken elektron mikroskobundaki  $30\mu\text{m}$ ' dir. Numune hazırlama oldukça kolaydır ve optik mikroskoptan farklı olarak pürüzlü numuneler incelenebilir. Numunelerde aranılan koşullar vakumda bozulmamaları ve iletken olmalarıdır. SEM' de ayırma gücü 300000 büyütmelerde  $4\text{nm}$ ' dir.

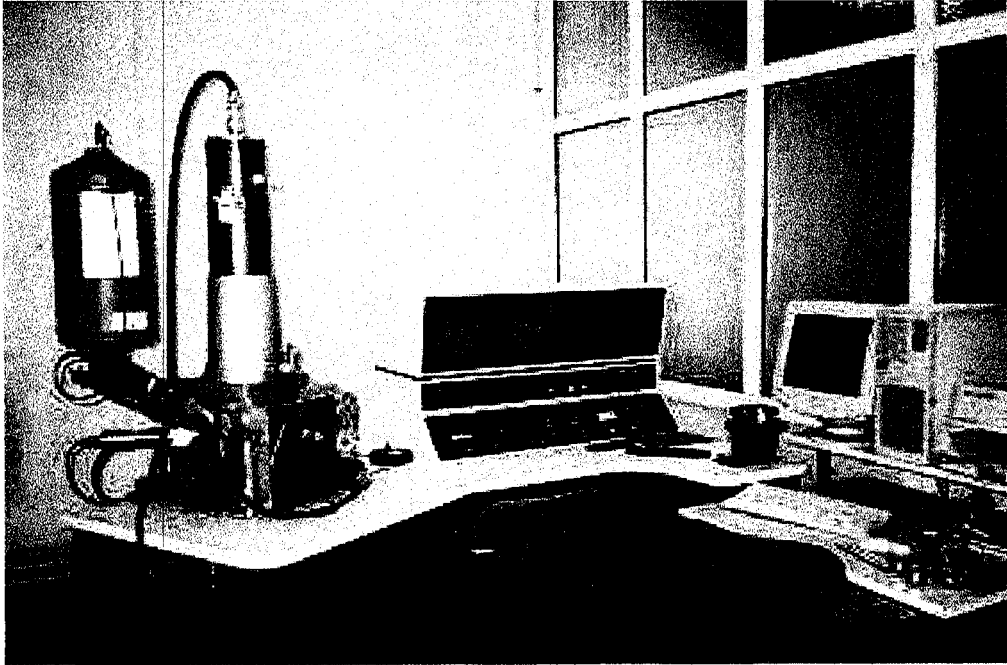
Taramalı elektron mikroskobunun sistemini elektron kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, demeti toplamak ve yönlendirmekte kullanılan kondenser ve objektif mercekleri, demet çapını sınırlamakta kullanılan açıklıklar, numune yüzeyini taraması için demeti uygun şekilde saptıran tarama bobinleri



oluşturur. Bunlara ilave olarak optik kolonun alt kısmında numune haznesi ve elde edilen sonuçları kaydetmek için fotoğraf makinesi ve bilgisayar bulunmaktadır. Birkaç kev enerjiye sahip elektronlar numuneye çarptıklarında numunede bulunan atomlara has karakteristik x ışınları üretilir ve numuneler hakkında bilgi elde etmemizi sağlarlar.

Kimyasal analiz çok küçük miktarlarda malzeme üzerinde veya geniş bir numunenin çok küçük bir kısmında gerçekleştirilebilir. Geleneksel olarak kullanılan kimyasal ve spektrografik metodlar bunu gerçekleştiremedikleri için katı malzemelerin karakterizasyonunda elektron mikroskobunda kimyasal analiz tekniği önem kazanmıştır. Ayrıca, elektron mikroskobundaki görüntüler eğer numune hakkında ön bilgi mevcut değilse neyi ifade ettiği söylenemez ve kimyasal analiz tekniğine ihtiyaç vardır. Bu da elektron mikroskoplarını optik mikroskoplara göre üstün kılan özelliklerin başında gelir. Yakın zaman içinde kimyasal analiz için özel dizayn edilmiş SEM cihazları da geliştirilmiştir (Turan 1996).

Deneyler sırasında kullandığımız Camscan marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı aşağıda görülmektedir.



Fotoğraf 3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

### 3.3. Asidik ve Bazik Direnç Tayini Yöntemi

Katı bir maddenin asit direncini ölçmek için önce madde iyice kurutulduktan sonra kütlesi ölçülür. Sonra % 10 HCl, % 10 HNO<sub>3</sub> ve % 10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bulunan çözelti içine atılarak 5 saat süre ile 75°C' de ısıtılır. Madde tekrar kurutulduktan sonra tartılır ve asit direncine karşı dayanımı yüzde olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

A<sub>1</sub>: Maddenin ilk kütlesi,

A<sub>2</sub>: Maddenin asit çözeltisine maruz kaldıktan sonraki kütlesi,

R<sub>A</sub>: Asidik dirence dayanım (yüzde olarak),

$$R_A = \frac{(A_1 - A_2)}{A_1} \times 100 \quad (3.1)$$

Katı bir maddenin baz direncini ölçmek için önce madde iyice kurutulduktan sonra kütlesi ölçülür. Sonra % 10 NaOH, bulunan çözelti içine atılarak 5 saat süre ile 75°C' de ısıtılır. Madde tekrar kurutulduktan sonra tartılır ve baz direncine karşı dayanımı yüzde olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

B<sub>1</sub>: Maddenin ilk kütlesi,

B<sub>2</sub>: Maddenin baz çözeltisine maruz kaldıktan sonraki kütlesi,

R<sub>B</sub>: Bazik dirence dayanım (yüzde olarak),

$$R_B = \frac{(B_1 - B_2)}{B_1} \times 100 \quad (3.2)$$

### 3.4. Isıl İletkenlik Katsayısı Tayini Yöntemi

Bir maddenin atom ve moleküllerinin titreşimi veya gazlarda moleküllerin çarpışmaları aracılığıyla ısı enerjisinin bir yerden başka bir yere iletilmesine iletkenlikle yayılma denir. İletilen madde değil, enerjidir. 1 m. kalınlığında, 1 m<sup>2</sup> kesitinde ve iki yüzü arasındaki sıcaklık farkı 1°K olan bir madde parçasından 1 saniyede geçen ısı miktarına ısı iletkenlik katsayısı denir. Isıl iletkenlik katsayısı “K” ile gösterilir ve birimi Wm<sup>-1</sup>°K<sup>-1</sup>’ dir. İyi bir ısı iletkeninin ısı iletkenlik katsayısı büyüktür, iyi bir yalıtkanın ise ısı iletkenlik katsayısı küçüktür (Ertaş 1995).

Çizelge 3.1’ de bazı maddelerin Wm<sup>-1</sup>°K<sup>-1</sup> birimi cinsinden ısı iletkenlik katsayıları verilmiştir. Bu maddelerin ısı iletkenlik katsayıları küçükten büyüğe doğru alt alta sıralanmıştır. Bu sıralamaya göre en iyi yalıtkan madde köpük (Stropor) olduğu görülmektedir. Isıl iletkenliği en büyük olan dayanıklı betonun yalıtkanlığı en kötüdür. Bunun için yapı endüstrisinde ısı iletkenliği küçük olan maddelerin kullanılması gündeme gelmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı maddelerin ısı iletkenlik katsayıları

Madde	Isıl İletkenlik Katsayısı (Wm <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup> )
Köpük (Stropor)	0,01
Hava	0,02
Poliüretan köpük	0,0247
Cam yünü	0,04
Fiberglas	0,0478
Ahşap	0,05-0,36
Tahta	0,13-0,39
Ytong ve Siporex	0,139-0,174
Asbest	0,174
Ateş tuğlası	0,46
Tuğla	0,73
Cam	0,79
Dayanıklı beton	0,81-1,74

Bir katı maddenin ısı iletkenlik katsayısını ölçebilmek için zamana karşı sıcaklık değişimini bulmak gerekir. Bunun için önce madde ölçülebilecek boyutta kesilerek içinden belirli uzunlukta nikel-krom tel geçirilir ve etrafı izolasyon ile kapatılır. Tele belirlenen akım verilerek ısıtılması sağlanır. Isıl çiftin bir ucu akımın verildiği telin girişine, diğer bir ucu ise maddenin dış yüzeyine konularak zamana karşı bu iki sıcaklık arasındaki farklar ölçülür.

t: Geçen süre,

T<sub>1</sub>: Telin sıcaklığı,

T<sub>2</sub>: Maddenin yüzeyinin sıcaklığı,

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (3.3)$$

Daha sonra  $\Delta T$ - $\ln t$  grafiği çizilir. Bu grafiğin eğimi bize S değerini verecektir.

$$S = \frac{\Delta T}{\ln t} \quad (3.4)$$

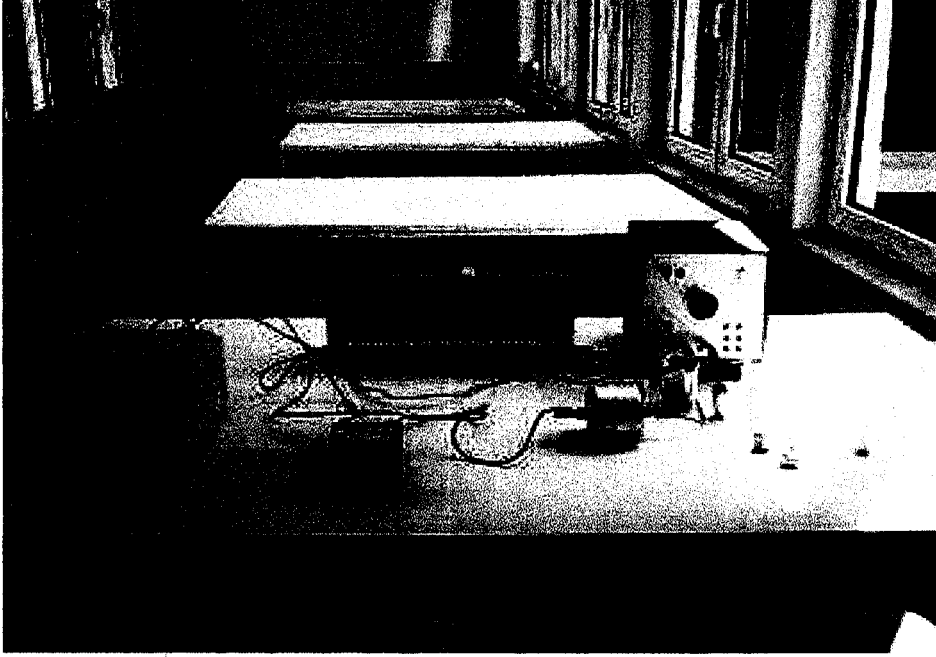
R: Telin direnci ( $\Omega$  s),

I: Telden geçen akım (A),

$$K = 18.34 \frac{I^2 \cdot R}{S} \quad (3.5)$$

formülünden ısı iletkenlik katsayısını bulabiliriz. Burada K ısı iletkenlik katsayısının birimi  $W m^{-1} \text{ }^\circ K^{-1}$  olarak çıkar (Klute 1986).

Bir maddenin ısı iletkenlik katsayısını tespit eden deney düzeneği fotoğraf 3.3.' te gösterilmiştir.



Fotoğraf 3.3. Isıl iletkenlik katsayısı ölçümü deney düzeneği

### 3.5. Sertlik Ölçüm Yöntemi

Bir mineralin sertliği onun aşınmaya karşı dayanıklılığıdır. Bulunan sertliğin aranan minerale mi, yoksa bir karışım veya oksitlenmiş yüzeyine mi ait olduğu çok önemlidir. Sertliği kırılganlık ile de karıştırmamak gerekir. Bir mineralin sertliğini ölçmek için değişik yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri mosh sertlik yöntemidir. Bu yöntem ile yapılan sertlik denemesinde amaca uygun seçilen mineral, miyar olarak kullanılacak materyale bir yumuşak ağaç çubuk yardımı ile bastırılarak, binoküler altında sürülür ve meydana gelmesi beklenen çizik aranır. Saflığı binokülerle tespit edilmiş mineral örneğinde aynı işlem makroskobik olarak da yapılır.

Genel tablo sertlik esasına göre beş grupta, düzenlenmiştir. Amaç her zaman bulunabilecek miyar malzemesi kullanılarak, mineralleri mümkün olduğu kadar az sayıda gruplar halinde toplamaktır.

Normal olarak bir insan tırnağının sertliği mosh sertlik cetvelinde 2.5 ile gösterilebilir; burada kalsit 3, çelik çakı 5.5, kuvars 7 ile gösterilmiştir. Kalsit ve

Çizelge 3.2. Mosh sertlik cetveli (Bozkurt 1985)

Talk	1
Jips	2
	2,5 İnsan tırnağı
Kalsit	3
Fluorit	4
Apatit	5
	5,5 Çelik çakı
Ortoz	6
Kuvars	7
Topaz	8
Korendon	9
Elmas	10

Normal olarak bir insan tırnağının sertliği mosh sertlik cetvelinde 2.5 ile gösterilebilir; burada kalsit 3, çelik çakı 5.5, kuvars 7 ile gösterilmiştir. Kalsit ve kuvars mineralleri kolay tanınan ve tabiatta çok rastlanan iki mineraldir. Genel çizelge bu suretle  $M \leq 2.5$ ,  $2.5 < M \leq 3$ ,  $3 < M \leq 5.5$ ,  $5.5 < M \leq 7$ ,  $7 < M$  gruplarına ayrılmıştır (Bozkurt 1985).

## 4. DENEY SONUÇLARI

### 4.1. Zeolit Üzerinde Yapılan Deneylerin Sonuçları

Yaptığımız bu çalışmada, Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç yörelerine ait zeolitik tüflerin yapıları incelenmiştir.

#### 4.1.1. X-ray difraksiyonu sonuçları

Deneylerde kullanılan Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç yörelerine ait zeolitik tüf örneklerinin x ışınları difraksiyonu sonucunda içinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunduğu tespit edilmiştir (Ek-1 ve Ek-2). Literatürdeki değerler ile bizim değerlerimiz aynı sonuçları göstermektedir.

#### 4.1.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları

Deneylerde kullanılan Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç yörelerine ait zeolitik tüf örneklerinin taramalı elektron mikroskobu sonuçlarına göre klinoptilolit yapısında bulunan elementlerin kullandığımız zeolitik tüf örneklerinin içinde bulunduğu tespit edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile klinoptilolit yapısının görüntüleri incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobunda bir görüntünün fotoğrafını alabilmek için incelenecek numune önce altın ile kaplanmaktadır. Bizim incelemek istediğimiz Balıkesir-Bigadiç ve Manisa-Gördes yöresi zeolitik tüflerin, altını adsorplaması sonucu zeolitik tüflerin görüntülerinin fotoğrafı alınamamıştır.

#### 4.1.3. Kimyasal analiz sonuçları

Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç yörelerine ait zeolitik tüf örneklerinin içindeki oksitlerin yüzdeleri Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Zeolitik tüf örnekleri içindeki oksit yüzdeleri

	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	ppp (%)
Manisa-Gördes	66,07	0,31	15,07	8,24	1,17	5,65	0,64	2,83	0,01
Balıkesir-Bigadiç	79,21	0,01	15,31	0,01	1,68	1,61	0,37	1,78	0,02

Çizelge.4.2. Kullanılan zeolitik tuf örneklerinin elementel analiz sonuçları

	Si (%)	Al (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	K (%)	Fe (%)	Ti (%)
Manisa-Gördes	59,13	13,49	8,61	1,12	0,72	5,04	11,47	0,42
Balıkesir-Bigadiç	74,43	17,71	2,13	2,31	0,67	2,44	0,01	0,01

Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç yörelerine ait zeolitik tuf örneklerinin elementel analiz sonuçları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile bulunmuştur. Çizelge 4.2' de Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç yörelerine ait zeolitik tuf örneklerinin içinde bulunan elementler ve oranları verilmiştir.

#### 4.1.4. Porozite sonuçları

Deneyleerde kullanılan zeolitik tuf örneklerinin gözenek boyutu dağılımı Nova 2200 Quantachorome marka adsorpsiyon cihazı vasıtasıyla bulunmuştur. Nova 2200 Quantachorome marka adsorpsiyon cihazında zeolitik tuf örneklerinin N<sub>2</sub> gazı kullanılarak gözenek çapı ve özgül yüzey alanı bulunmaktadır. Buna göre; Balıkesir-Bigadiç yöresinden çıkarılan zeolitik tuf örneklerinin ortalama gözenek çapı, 76,43 Å bulunmuştur. Özgül yüzey alanı ise çoklu nokta BET analizi yöntemine göre 51,48 m<sup>2</sup>/g bulunmuştur. Manisa-Gördes yöresinden çıkarılan zeolitik tuf örneklerinin ortalama gözenek çapı, 74,58 Å bulunmuştur. Özgül yüzey alanı ise çoklu nokta BET analizi yöntemine göre 52,65 m<sup>2</sup>/g bulunmuştur.

#### 4.1.5. Yoğunluk tayini sonuçları

Deneyleerde kullanılan zeolitik tuf örneklerinin yoğunlukları piknometre ile ölçülmüş bu göre; Balıkesir-Bigadiç yöresinden çıkarılan zeolitik tuf örneklerinin yoğunluğu 2,4600 g/cm<sup>3</sup> bulunmuştur. Manisa-Gördes yöresinden çıkarılan zeolitik tuf örneklerinin yoğunluğu ise 2,3017 g/cm<sup>3</sup> bulunmuştur.



#### 4.1.6. Su tutma sonuçları

Deneylerde kullanılan zeolitik tuf örnekleri 1-2 mm boyutuna getirildikten sonra 10 g'lık numuneler hazırlanarak saf su içinde 48 saat ve 7 gün süre ile bırakılmıştır. Su tutma miktarları hesaplanarak aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

Balıkesir-Bigadiç yöresinden çıkarılan zeolitik tuf örnekleri önce hassas terazide kuru olarak tartılmış ve 10 g olarak alınan numune örnekleri 48 saat saf su içinde bırakılmıştır. Su tutma miktarları ortalama % 52 olarak tespit edilmiştir. Zeolitik tuf örneklerini daha sonra 7 gün süre ile su içinde bırakıldığında su emme miktarları ortalama % 53 olarak tespit edilmiştir.

Manisa-Gördes yöresinden çıkarılan zeolitik tuf örnekleri önce hassas terazide kuru olarak tartılmış ve 10 g olarak alınan numune örnekleri 48 saat saf su içinde bırakılmıştır. Su tutma miktarları ortalama % 92 olarak tespit edilmiştir. Zeolitik tuf örneklerini daha sonra 7 gün süre ile su içinde bırakıldığında su tutma miktarları ortalama % 94 olarak tespit edilmiştir.

#### 4.1.7. Isıl iletkenlik katsayısı tayini sonuçları

Manisa-Gördes yöresinden çıkarılan, içinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunan zeolitik tüflerden elde edilen anafom' un, hafif yapı endüstrisinde kullanımının daha uygun olduğu görüldüğü için bu yöre zeolitlerinin ısı iletkenlik katsayısı tespit edilmiştir. Isıl iletkenlik katsayısının tespiti için direnci 0,12  $\Omega$  olan nikel-krom tel kullanılmış ve tele 0,8 A akım verilmiştir. Her 60 saniyede ölçüm alınmak üzere 1 saat boyunca sıcaklık değişimleri incelenmiştir.  $\Delta T/Int$  grafiği çizilerek bu grafiğin eğiminden  $S = 3,44$  olarak bulunmuştur. (3.5) bağıntısından ısı iletkenlik katsayısının değeri  $K = 0,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  bulunmuştur.

#### 4.1.8. Sertlik ölçüm sonuçları

Deneylerde kullandığımız Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç yörelerine ait zeolitlerin mosh sertlik ölçüm yöntemine göre sertliğinin 2.5-5.5 arası olduğu bulunmuştur.

## 4.2. Anafom Üzerinde Yapılan Deneylerin Sonuçları

Deneyler sonucunda oluşturduğumuz hafif yapılı malzeme “Anafom” “Anadolu Köpüğü” anlamına gelmektedir. Elde edilen anafom, özelliğinden dolayı gözenekli ve hafif yapılı bir malzemedir.

### 4.2.1. Anafom’ un hazırlanması

Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç yörelerinden çıkarılan zeolitik tüfler 1-2 mm boyutlarına getirildikten sonra, bu zeolitik tüflerden 10 g’ lık numuneler hazırlanıp, yüksek sıcaklığa dayanıklı kaplara konulup zeolitik tüflerin erime sıcaklıkları tespit edilmiştir. Yapılan denemelerde ideal erimenin parçacık boyutunun 1-2 mm arasında olduğu belirlenmiştir. Çizelge 4.3’ de Manisa-Gördes yöresine ait zeolitik tüflerin, boyutlarına göre erime sıcaklıkları verilmiştir.

Zeolitik tüflerin boyutları 2 mm’ den büyük olduğunda erimenin yüksek sıcaklıkta olduğu görülmüştür. Bu da enerji sarfiyatı demektir. Amaç enerji sarfiyatını azaltmak olduğuna göre ideal erimenin parçacık boyutu 1-2 mm arası olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.4’ de Balıkesir-Bigadiç yöresine ait zeolitik tüflerin boyutlarına göre erime sıcaklıkları verilmiştir. Manisa-Gördes yöresine ait 1-2 mm arası boyuttaki zeolitik tüflerin ve Balıkesir-Bigadiç yöresine ait 1 mm boyuttaki zeolitik tüflerin sıcaklığa bağlı erime durumlarını incelenmiştir.

Çizelge 4.3. Manisa-Gördes yöresine ait zeolitik tüf örneklerinin erime sıcaklıkları

Kayaç Boyutu (mm)	Erime Sıcaklığı (°C)	$T_{max}$ ’ a Çıkış Süresi (dak.)	$T_{max}$ ’ ta Bekleme Süresi (dak.)	$T_{max}$ ’ tan İniş Süresi (dak.)
>2’den	1450	30	30	30
1-2	1300	30	30	30
0.5-1	1275	30	30	30
0.5-0.4	1275	30	30	30
0.4-0.3	1275	30	30	30
0.3-0.2	1250	30	30	30
0.2-0.1	1250	30	30	30
0.1-0.05	1250	30	30	30
< 0.05’den	1250	30	30	30

Çizelge 4.4. Balıkesir-Bigadiç yöresine ait zeolitik tüf örneklerinin erime sıcaklıkları

Kayaç Boyutu (mm)	Erime Sıcaklığı (°C)	T <sub>max</sub> ' a Çıkış Süresi (dak.)	T <sub>max</sub> ' ta Bekleme Süresi (dak.)	T <sub>max</sub> ' tan İniş Süresi (dak.)
> 2' den	1470	30	30	30
1-2	1300	30	30	30
0.5-1	1300	30	30	30
0.5-0.4	1300	30	30	30
0.4-0.3	1275	30	30	30
0.3-0.2	1275	30	30	30
0.2-0.1	1250	30	30	30
0.1-0.05	1200	30	30	30
< 0.05' den	1200	30	30	30

Anafom' un hazırlık öncesinde, kullanılan her bir zeolitik tüf örneklerinin ayrı ayrı sıcaklıklardaki erime durumları incelenmiştir. Tam erimenin 1300°C' de başladığı görüldüğünden 1150°C' den itibaren erime durumları incelenmeye alınmıştır.

1150-1300°C arası kullanılan zeolit içeren kaya parçacıklarının boyutları Manisa-Gördes yöresi için 1-2 mm arası, Balıkesir-Bigadiç yöresi için 1 mm seçilmiştir. Buna göre;

1150°C' de porselen krozeye konulan Balıkesir-Bigadiç yöresine ait zeolitik tüflerin krozeeye yapışmaya başladığı, Manisa-Gördes yöresine ait olan alümina krozedeki zeolitik tüflerin ise, birbirine yapışarak katı bir madde oluşturdukları gözlenmiştir.

1200°C' de porselen kroze kırılmış ve içindeki Balıkesir-Bigadiç yöresine ait zeolitik tüfler krozeeye yapışık hale gelmişlerdir. Balıkesir-Bigadiç yöresine ait zeolitik tüflerin ise erimeye başladığı, alümina krozedeki Manisa-Gördes yöresine ait zeolitik tüflerin krozeeye yapıştığı ve erimenin başladığı gözlenmiştir.

1250°C' de krozeler kırılmıştır. Alümina krozedeki Manisa-Gördes yöresine ait zeolitik tüfler az erime ile birbirine yapışık durumda kırılarak fırından çıkarılmıştır. Porselen krozedeki Balıkesir-Bigadiç yöresine ait zeolitik tüflerin ise krozeeye daha yapışmış durumda oldukları görülmüştür.

1300°C' de Manisa-Gördes yöresine ait zeolitik tüflerin bulunduğu alümina kroze fırından çıkarıldığında tam olarak erimenin gerçekleştiği

gözenmiştir. Porselen krozedeki Balıkesir-Bıgadiç yöresine ait zeolitik tüflerin ise krozenin içinde iyice eriyerek kroze tabanına ve krozenin iç çevresine yapıştığı gözlenmiştir.

Her iki krozedeki zeolitik tüflerde sıcaklıklar sırasında bir miktar azalma görülmüştür. Bu azalmanın % 20 oranında olduğu saptanmıştır. Bu azalmanın sebebi tane boyutunun yüksek sıcaklıkta erimesiyle hacminin küçülmesi olarak ifade edilir.

Anafom hazırlanmasında kullanılan zeolitik tüf örnekleri sıcaklığa bağlı olarak değişimler göstermektedir. Zeolitik tüf örneklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimlerini maddeler halinde ifade edebiliriz. Buna göre;

1- Sıcaklık 25-1100°C arasında; içinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunan zeolitik tüfler, hidrojen gazı içermezler. Bu sıcaklık arasında zeolitik tüfler geçiş evresindedirler ve amorf yapıdadırlar. Bu sıcaklık arasında proplastik ve sinterleme yapıya geçmeye başlarlar.

2- Sıcaklık 1300°C' de ( $T_{max}$ ); zeolitik tüfler erir, faz değişimi olur, ve bu sıcaklık akıcı eriyikte kristallenme evresinin başlangıcı olan sıcaklıktır.

3-  $T_{max}$ ' ta bekletilirse; çok gözenekli yapı, camsı yapıya gelişir.

4- Sıcaklık  $T_{max}$ -600°C arasında katılma çok gözenekli yapılanmanın en yüksek olduğu durumdur.

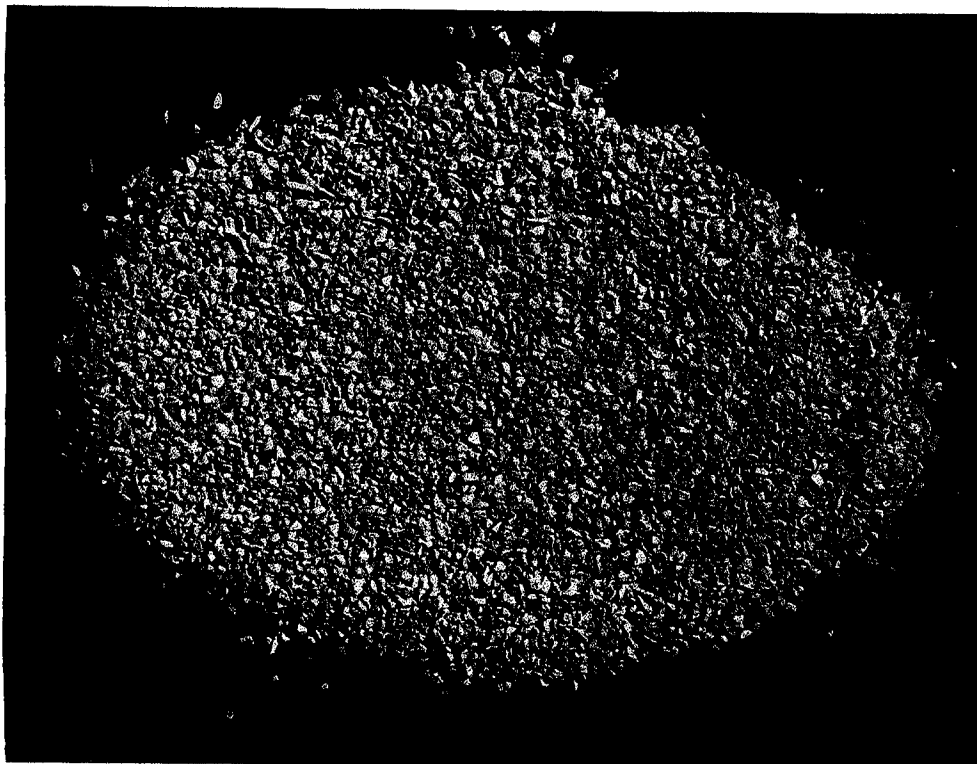
5- 600-25°C arasında; gözenekli yapı tavlınır. Bu son serbest durumdur.

İçinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunan zeolitik tüf boyutunun çok küçük olmasına gerek yoktur. İçinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunan 1-2 mm boyutundaki zeolitik tüflerin, gaz çıkarıcı madde ile karıştırılarak ısıtılması, karışımın köpürmesini sağlar. Çok gözenekli homojen yapının oluşması için en önemli faktörlerden biri, sıcaklığın dengeli ve durağan olmasıdır. 1150-1300°C arasında çeşitli değerler boyunca uzanan, içinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunan zeolitik tüf örneklerinin büyük bir bölümünün erime noktası doğaldır. İçinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunan iki tip yataktan alınan zeolitik tüf örneklerinin köpüklenme durumlarını incelenmiştir. Buna göre köpüklenme durumlarının üç çeşit olduğu belirlenmiştir. Buna göre;

- 1- K p rmeyen
- 2- Orta derece köpüren
- 3- İyi köpüren

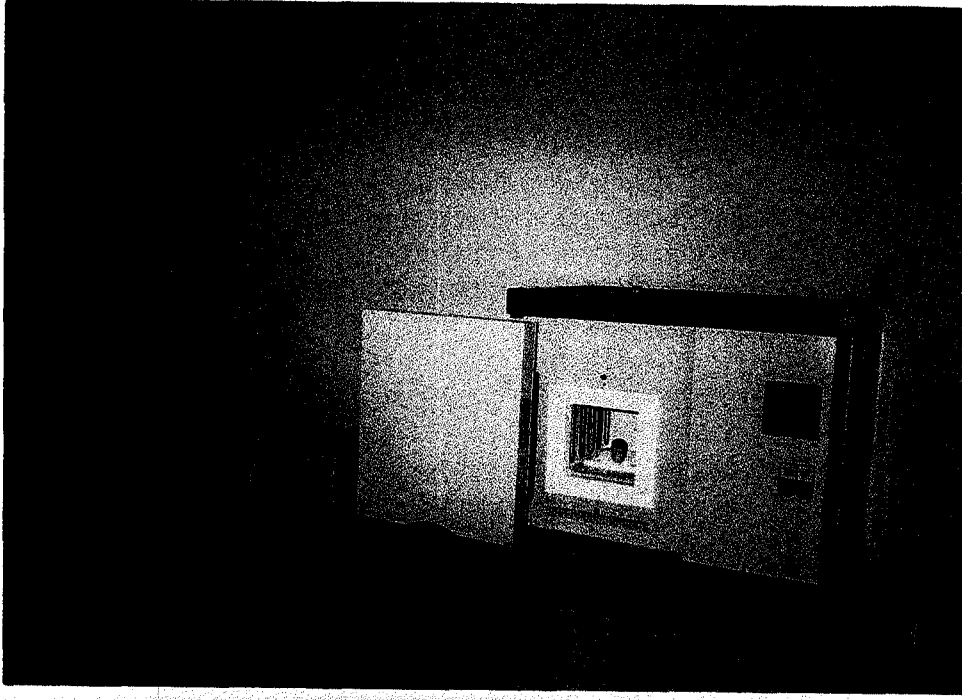
İçinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunan zeolitik tüfler aynı yatakta bile kimyasal ve mineral içeriğine, dokularına göre farklılıklar gösterdikleri belirlenmiştir. Bu farklılıklar sonucu 1150-1300°C sıcaklıklar arasında bazı zeolitik tüflerde kendiliğinden köpüklenme g r lm ştir.

Deneyler sırasında üç tip boyutta zeolitik t f kullanılmıştır. Bunlar; 1. tip; 0,1-0,5 mm arası, 2. tip; 0,5-1 mm arası, 3. tip;1 -2 mm arası. Balıkesir-Bigadiç yoresindeki yatlardan çıkarılan zeolitik tüflerin rengi yeşile yakın renktedir. Manisa-Gördes yoresindeki yatlardan çıkarılan zeolitik tüflerin rengi gri-beyaz karışımıdır. Fotoğraf 4.1' de Manisa-Gördes yoresinde çıkarılan zeolitik tüflerin görünümü verilmiştir.



Fotoğraf 4.1. Manisa-Gördes yoresi zeolitik tüflerin tane boyutlu görünümü

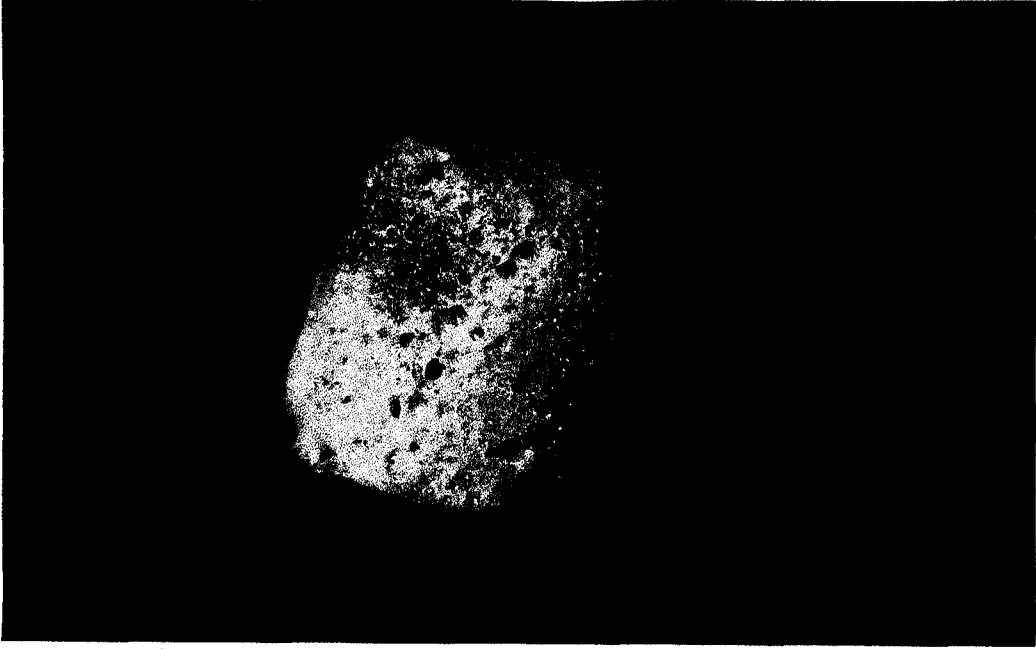
Zeolitik tf numunelerinin eritilmesi ve tavlانmasında Nabertherm HT 08/16 yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır. Bu fırının sıcaklığı 1600°C' ye kadar çıkmaktadır. Bu fırının görünümü fotoğraf 4.2' de verilmektedir.



Fotoğraf 4.2. Yüksek sıcaklık fırını

Anafom' u elde etmek için genelde "TOZ" metodu kullanılmaktadır. Zeolitik tüfler 1-2 mm' ye kadar küçültülerek gaz çıkaran madde ile karıştırılır, sıcağa dayanıklı kaplara konulup 1280-1300°C arası ısıtılarak kpklendirilir.

Balıkesir-Bigadiç ve Manisa-Gördes yörelerinden alınan örnekler ile (ki bu örneklerin içinde doğal zeolitlerden % 40 oranında klinoptilolit olduğu tespit edilmiştir) SiC ile karıştırarak sıcaklığa dayanıklı kaplara koyup, 1300°C' de ısıtarak kpklendirdik. Yoğunluğunda görünür bir artış olmadan elde ettiğimiz hafif yapılı malzeme olan anafom' un sadece kendiliğinden köpüren zeolitik tüflerden elde etme imkanı bulunmaktadır. Fotoğraf 4.3' te anafom' un görüntüsü verilmektedir. Fotoğrafta da görüldüğü gibi anafom gözenekli bir malzemedir. Yapı endüstrisinde kolaylıkla kullanılabilir. Anafom' un yapısı geliştirilerek değişik boyutlarda ve renklerde elde etme imkanı bulunmaktadır.



Fotoğraf 4.3. Anafom görüntüsü.

#### 4.2.2. Anafom' un yoğunluk tayini sonuçları

Anafom' un yoğunluk tayini sonuçları değişik yöntemlerle bir çok deney yapılarak bulunmuştur. Bunlardan bir tanesi Nova 2200 Quantachrome marka adsorpsiyon cihazı ile elde edilen sonuçtur. Buna göre önce 1300°C' de zeolitik tüflerin eritilmesi ile elde edilmiş anafom, kırılarak toz haline getirilmiş ve adsorpsiyon cihazında üzerine N<sub>2</sub> gazı kullanılarak yoğunluğu 0,2508 g/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur.

Piknometre ile saf su kullanılarak ölçülen 1200°C' de zeolitik tüflerin eritilmesi ile elde edilmiş anafom' un yoğunluğu; Balıkesir-Bigadiç yöresinden çıkarılan zeolitik tüflerden elde edilen anafom için 1,1791 g/cm<sup>3</sup>, Manisa-Gördes yöresinden çıkarılan zeolitik tüflerden elde edilen anafom için 0,8673 g/cm<sup>3</sup> bulunmuştur. Piknometre ile yoğunluğu 0,79 g/cm<sup>3</sup> olan alkol kullanılarak ölçülen 1200°C' de zeolitik tüflerin eritilmesi ile elde edilen anafom' un yoğunluğu ise; Balıkesir-Bigadiç yöresinden çıkarılan zeolitik tüflerden elde edilen anafom için 1,1851 g/cm<sup>3</sup>, Manisa-Gördes yöresinden çıkarılan zeolitik tüflerden elde edilen anafom için 0,8698 g/cm<sup>3</sup> bulunmuştur.

#### 4.2.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonucu

Elde edilen anafom taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Anafom' un gözenek boyutunun 350-1200  $\mu\text{m}$  arası olduğu saptanmıştır (Ek-3).

#### 4.2.4. X-ray difraksiyonu sonuçları

Elde edilen anafom' un x ışınları analizi sonucu, anafom' un içinde amorf silika olduğu ortaya çıkmıştır. Anafom' un üretildiği sıcaklıkta (1300°C' de) anafom' un eldesinde kullanılan doğal zeolitlerden klinoptilolitin yapısı bozulduğu, anafom' un eldesinde gaz üretici madde olarak kullanılan SiC' ün yapısını olduğu gibi koruduğu gözlenmiştir. Kristal bozulmanın klinoptilolitte gözlemlendiği görülmüştür (Ek-4).

#### 4.2.5. Mukavemet sonuçları

Elde edilen anafom' un mukavemeti serbest basınç dayanımı uygulanarak bulunmuştur. Zemin numunesine çevre basıncı tatbik edilmeksizin, düşey basınca maruz bırakılarak kırılması ile elde edilen dayanıma, tek eksenli drenajsız basınç dayanımı denir. Bu zeminin en büyük dayanımıdır. En büyük kuvvetin alana bölünmesiyle elde edilen maksimum gerilmeye serbest basınç direnci denir.

Anafom' un mukavemetini sıkıştırma dayanımına göre incelediğimizde sıkıştırma dayanımı, anafom' un yoğunluğuna göre değişim göstermiştir. Anafom' un sıkıştırma mukavemeti Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Laboratuvarı' nda yapılmıştır. Çizelge 4.5' te anafom' un sıkıştırma mukavemetinin, yoğunluğa göre değişimi verilmiştir.

Çizelge 4.5. Anafom' un sıkıştırma mukavemeti

Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Sıkıştırma dayanımı (MPa)
0,2508	4
0,8673	15



#### 4.2.6. Porozite sonuçları

Elde edilen anafom' un gözenek boyutu dağılımı Nova 2200 Quantachorome marka adsorpsiyon cihazı vasıtasıyla bulunmuştur. Nova 2200 Quantachorome marka adsorpsiyon cihazında N<sub>2</sub> gazı kullanılarak anafom' un gözenek çapı ve özgül yüzey alanı bulunmaktadır. Anafom' un ortalama kapalı gözenek çapı ise 38,917 Å bulunmuştur. Özgül kapalı yüzey alanı ise çoklu nokta BET analizi yöntemine göre 4,498256 m<sup>2</sup>/g bulunmuştur. Anafom' un porozite sonuçları ile kullandığımız zeolitik tüflerin porozite sonuçları farklıdır. Bu farklılık anafom' un yapısında kapalı gözeneklerin bulunmasından kaynaklanmaktadır.

#### 4.2.7. Su tutma sonuçları

Elde edilen değişik anafom örnekleri saf su içinde 48 saat ve 7 gün süre ile bırakılmışlardır. Buna göre; Balıkesir-Bigadiç yöresinden çıkarılan zeolitik tüf örnekleri ile elde edilen anafom 200°C' de önce ısıtılarak içindeki su atılmış sonra 48 saat saf su içinde bırakılmıştır. Su tutma miktarı ortalama % 14 olarak tespit edilmiştir. Balıkesir-Bigadiç yöresinden çıkarılan zeolitik tüf örnekleri ile elde edilen anafom daha sonra saf su içinde 7 gün bekletilmiş ve ortalama su tutma miktarı % 15 olarak tespit edilmiştir. Manisa-Gördes yöresinden çıkarılan zeolitik tüf örnekleri ile elde edilen anafom 200°C' de önce ısıtılarak içindeki su atılmış sonra 48 saat saf su içinde bırakılmıştır. Su tutma miktarı ortalama % 7 olarak tespit edilmiştir. Manisa-Gördes yöresinden çıkarılan zeolitik tüf örnekleri ile elde edilen anafom daha sonra saf su içinde 7 gün bekletilmiş ve ortalama su tutma miktarı % 8 olarak tespit edilmiştir.

#### 4.2.8. Asidik ve bazik direnç tayini sonuçları

Anafom' un asidik direncini bulmak için anafom 200°C' de kurutulmuş ve kütlesi A<sub>1</sub> = 11,3209 g bulunmuştur. Daha sonra asit çözeltisi içinde bekletilmiştir. Asit çözeltisine maruz kaldıktan sonraki kütesinin A<sub>2</sub> =11,3108g olduğu görülmüştür. (3.1) bağıntısı kullanılarak anafom' un asite karşı direncinin R<sub>A</sub> = % 0,0089 olduğu bulunmuştur. Anafom' un bazik direncini bulmak için

anafom 200°C' de kurutulmuş ve kütlesini  $B_1 = 16,5247$  g bulunmuştur. Daha sonra baz çözeltisi içinde bekletilmiştir. Baz çözeltisine maruz kaldıktan sonraki kütlesinin  $B_2 = 16,5038$  g olduğu görülmüştür. (3.2) bağıntısı kullanılarak anafom' un bazik direncinin  $R_B = \% 0,126$  olduğu bulunmuştur.

#### 4.2.9. Isıl iletkenlik katsayısı tayini sonuçları

Anafom' un ısıl iletkenlik katsayısı tayini de Manisa-Gördes yöresi zeolitik tüflerin ısıl iletkenlik katsayısı tayini yöntemine benzer şekilde yapılmıştır. Isıl iletkenlik katsayısının tespiti için direnci  $0,05 \Omega$  olan nikel-krom tel kullanılmış ve tele  $0,8$  A akım verilmiştir. Her 60 saniyede ölçüm alınmak üzere 1 saat boyunca sıcaklık değişimleri incelenmiştir.  $\Delta T / \ln t$  grafiği çizilerek bu grafiğin eğiminden  $S = 16,88$  olarak bulunmuştur. (3.5) bağıntısından ısıl iletkenlik katsayısının değeri  $K = 0,03 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  bulunmuştur.

#### 4.2.10. Sertlik ölçüm sonuçları

Mosh sertlik ölçüm yöntemine göre anafom' un sertliğinin  $8,5$  olarak bulunmuştur. Mosh sertlik cetvelinde camın sertlik derecesi belirtilmemiştir ancak anafom' un cam üzerinde de iz bıraktığı yani camı çizdiği gözlenmiştir.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Deneylerde elde edilen gözenekli hafif yapı malzemenin (anafom) fiziksel özellikleri diğer homojen gözenekli maddelerle kıyaslandığında, bazı yönleriyle farklı, bazı yönleriyle de benzer özellikler olduğu gözlenmiştir. Anafom' un fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 5.1' de verilmiştir.

Anafom kendine has süs özelliklerine de sahiptir. Anafom' un rengi yapımında kullanılan zeolitik tüflerin çıkarıldığı yatağa göre gri-beyazdan yeşile kadar değişmektedir. Örneğin, Manisa-Gördes yöresindeki yataktan çıkartılmış zeolitik tüflerden elde edilen anafom' un rengi gridir. Balıkesir-Bigadiç yöresinden alınan zeolitik tüflerden elde edilen anafom' un rengi yeşildir. Hafif yapı malzemedeki zeolitik tüfler, sıcaklıkla başka renklere de dönüşebilmektedir.  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$  ve diğer renklendirici oksitler içermelerine göre zeolitik tüfler beyazdan griye yakın (açık gri, açık kahverengi) renkler alabilir.

Elde ettiğimiz hafif yapı malzeme olan anafom' un benzeri yapı malzemeleri ile karşılaştırılması Çizelge 5.2' de verilmiştir. Buna göre, anafom diğer hafif yapı malzemelere göre daha kullanışlı ve ekonomiktir. Gelecek yıllarda dünya nüfusunun artmasıyla birlikte enerji giderlerinin de artacağı düşünülecek olunursa, yapılarda anafom kullanılması ile enerji tasarrufundan büyük ölçüde faydalanılmış olunacaktır.

Çizelge 5.1. Anafom' un fiziksel ve kimyasal özellikleri

Yoğunluk ( $g/cm^3$ )	0,2-0,9
Isıl iletkenlik katsayısı ( $Wm^{-1}oK^{-1}$ )	0,03
Sıkıştırma mukavemeti (MPa)	4-15
Ortalama gözenek çapı (Å)	38,917
Özgül yüzey alanı ( $m^2/g$ )	4,49
Su tutma yüzdesi (%)	8
Asidik direnci (%)	0,0089
Bazik direnci (%)	0,126
Sertliği (Mosh)	8,5

Çizelge 5.2. Değişik yapı malzemelerinin bazı özelliklerinin karşılaştırılması

Malzeme	Sıkıştırma Dayanımı (MPa)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Isıl İletkenlik Katsayısı (W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup> )
Yüksek Mukavemetli Beton	80	2,4	0,81-1,74
Yapı Taşları	25,16,11,7,5,3	2,0-2,8	2,0-3,48
Ytong ve Sporex	2-6	0,4-0,6	0,139-0,174
Asbest	-	0,195	0,174
Cam Yünü	-	0,1-0,2	0,03-0,06
Ateş Tuğlası	~55 (max)	1,8-2,2	0,46
Tuğla	34 (max)	1,4-1,6	0,81
Hava	-	1,293x10 <sup>-3</sup>	0,019
Anafom	4-15	0,2-0,9	0,03-0,2

Çizelge 5.2' in incelenmesinden de görüleceği gibi anafom' un taş kadar sert, köpük kadar hafif olacağını söyleyebiliriz.

Anafom' u geliştirmek için şu gibi araştırmalar önerilebilir;

1-Anafom yapımında değişik yataklardan alınan zeolitik tüflerin kullanımı.

2-Arzu edilen gözenek çapında anafom yapımı.

3-Anafom' un yapımında erime sıcaklığında erimiş maddenin viskozitesinin incelenmesi ve viskozitenin gözenek çapına etkisinin araştırılması.

4-Anafom' un gözenek çapının ısı iletkenlik, mukavemet, yoğunluk ve fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi.

5-Anafom' un yapımında kullanılan SiC' ün değişik miktarlarının ve tiplerinin gözenek çapına etkisinin araştırılması.

6-Tavlama sıcaklığının anafom' un yapısına etkisinin incelenmesi.

Anafom doğal zeolitlerin hafif yapı endüstrisinde kullanılması için büyük bir önem taşımaktadır. Anafom' un ticari olarak üretilmesiyle doğal zeolitlerin endüstride kullanılması giderek artacaktır.

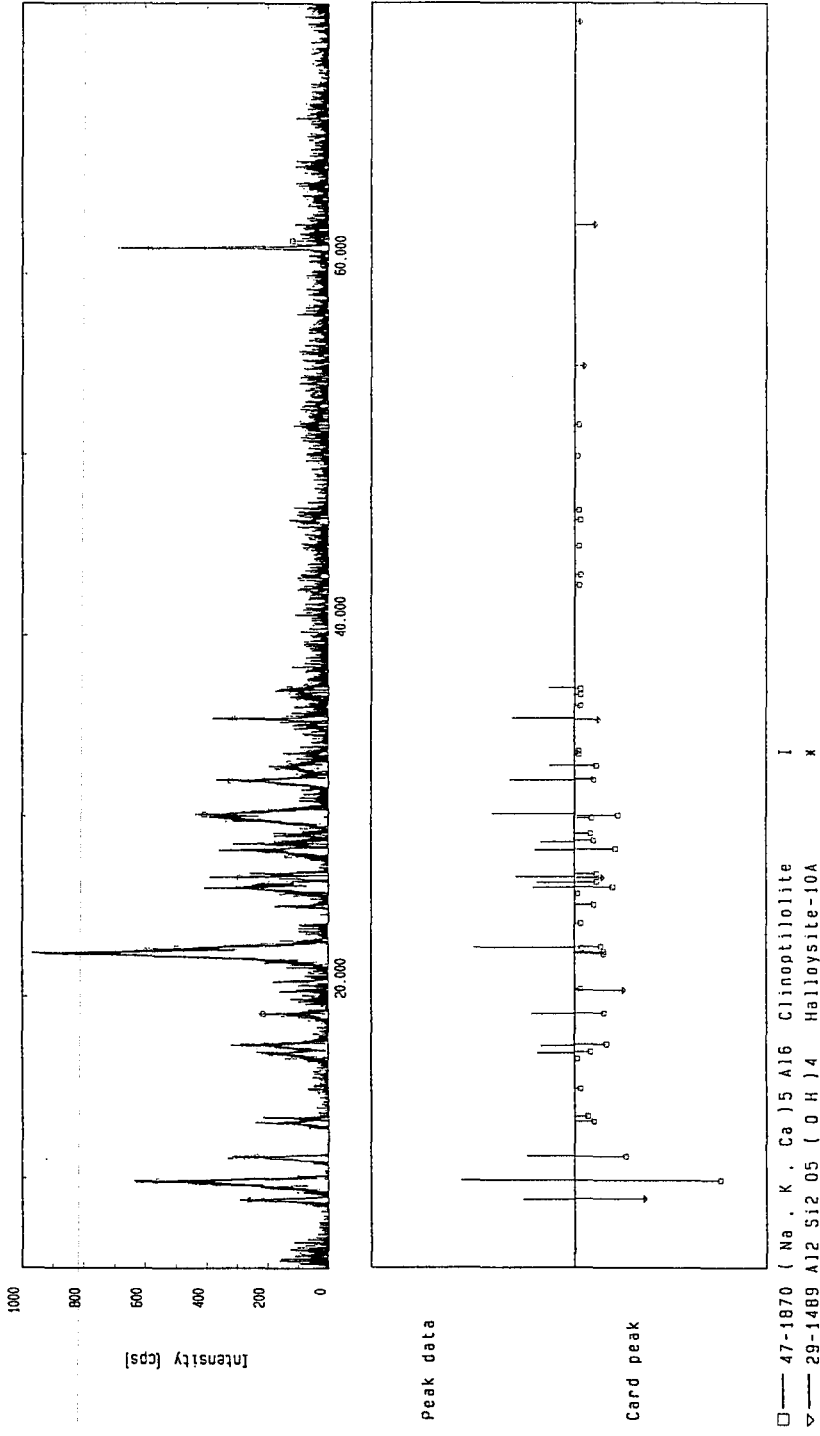
## 6. KAYNAKLAR

1. BOZKURT, R., *Mineral Tanıma El Kitabı*, Anadolu Üniversitesi Yayınları No:113, Eskişehir, s. 16, 1985.
2. BUDNIKOV, P.P., *The Tecnology of Ceramics and Refractories*, The M.I.T. Press, p. 316, 1964.
3. ÇETİNEL, G., *Dünyada ve Türkiye' de Zeolit*, MTA Hizmetiçi Eğitim Çalışması, Ankara, 1993.
4. DİKMEN, S., *Doğal Gazın (Metan) Doğal Zeolitlerde Adsorpsiyonu*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 59 s., Eskişehir, 1998.
5. DİKMEN, Z., *Karbondiyoksitin Doğal Zeolitlerde Adsorpsiyonu*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 63 s., Eskişehir, 1998.
6. DYER, A., *An Introduction to Zeolite Molecular Sieves*, John Willey , p. 80, 1988.
7. ERTAŞ, İ., *Denel Fizik Dersleri*, Fen Fakültesi Ders Kitapları Serisi Ege Üniversitesi Yayınları, İzmir, No:38, 1995.
8. FU, Y., DİNG, J., BEAUDOİN, J.J., *Zeolite-Based Lightweight Concrete Products*, United States Patent, N: 5,494,513, 1996.
9. GÜNDÜZ, E., *Modern Fiziğe Giriş*, Ege Üniversitesi Yayınları, İzmir, s. 110, 1988.
10. GOTTARDI, G., GALLI, E., *Natural Zeolites*, Springer Verlag, Berlin, 1985.
11. İZCİ, E., *Doğal Zeolitlerin Deterjan Üretiminde Kullanabilirliğinin İncelenmesi*, Y. Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 59 s., 1995.
12. KAZANTSEVA, L.K., BELİTSKY, I.A., FURSENKO, B.A., *Breş Dokulu Siberfoam*, Cam ve Seramik (çev.Russian), N: 12, p. 6-8, 1995.
13. KAZANTSEVA, L.K., BELİTSKY, I.A., FURSENKO, B.A., DEMENTYEV, S.N., *Siberfoam'ın Mekanik ve Fiziksel Özellikleri*, Kaynak Kullanımını Tasarrufları (çev.Russian), 1995.
14. KAZANTSEVA, L.K., BELİTSKY, I.A., FURSENKO, B.A., *Siberfoam*, United Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Siberian Division, 1995.

15. KAZANTSEVA, L.K., BELITSKY, I.A., FURSENKO, B.A., VASILYEVA, N.G., *Siberfoam*, Silikatların Tekniği ve Teknolojisi (çev.Russian), N: 3-4, p. 32-37, 1995.
16. KAZANTSEVA, L.K., BELITSKY, I.A., FURSENKO, B.A., *Zeolite-Containing Rocks as Raw Material for Siberfoam Production*, Natural Zeolites Sofia' 95, Sofia-Moscow, p. 33-42, 1997.
17. KLUTE, A., *Methods of Soil Analysis*, American Society of Agronomy, p.949, 1986.
18. MUMPTON, F.A., *Minerology and Geology of Natural Zeolites*, Minerology Society of America, 1986.
19. ONARAN, K., *Malzeme Bilimi*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, s. 338-339, 1993.
20. ORHUN, Ö., *Zeolitlerde İyon Değişimi*, Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, s. 53, 1997.
21. PEARSON, K., *Eco-minerals: Opportunnites on the Green scene*, Instustial Minerals, p. 25-35, 1998.
22. SARIİZ, K., NUHOĞLU, İ., *Endüstriyel Hammadde Yatakları ve Madenciliği*, Anadolu Üniversitesi Yayınları, No:636, Eskişehir, s. 438-439, 1992.
23. SİRKECİOĞLU, A., ERDEM-SENATALAR, A., *Bigadiç Klinoptilolit Rezervi İçin Örneklerin Zeolit İçeriklerini Belirlemede Kullanılabilecek Pratik Bir Yöntem*, 1. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongeresi, O.D.T.Ü., Ankara, 13-16 Eylül 1994.
24. SOMIYA, S., INAMATA, Y., *Silikon Carbide Ceramics I*, Else Vier, p. 47, 1991.
25. SÜMER, G., *Endüstriyel Seramikler Cilt II*, Anadolu Üniversitesi Yayınları No: 654, Eskişehir, s. 469, 1993.
26. SÜMER, G., *Endüstriyel Seramikler Cilt III*, Anadolu Üniversitesi Yayınları No: 837, Eskişehir, s. 157, 1994.
27. SÜMER, G., *Seramik Sanayi El Kitabı*, Anadolu Üniversitesi Yayınları No: 338, Eskişehir, s. 213-214, 1988.
28. TURAN, S. *Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)*, Lisans Ders Notları, Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Seramik Mühendisliği, 1996.
29. TSITSISHVILI, G.V., *Natural Zeolites*, p. 4-17, Ellis Horwood, 1992.

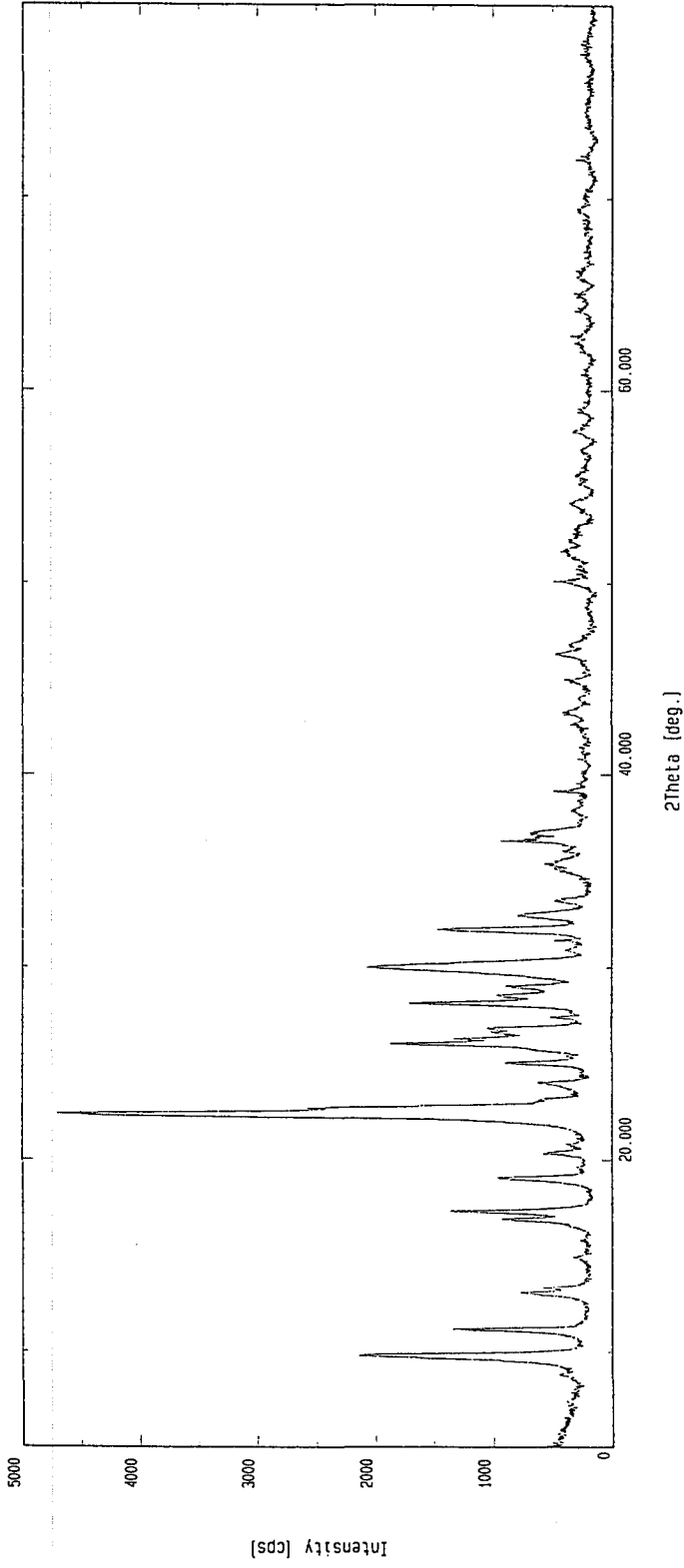
30. ÜLKÜ, S., TURGUT, F., *Zeolitler ve Uygulama Alanları*, 5. Ulusal Kil Sempozyumu, Eskişehir, s. 387-400, 16-20 Eylül 1991.
31. ÜNALDI, T., *Bigadiç Yöresi Doğal Zeolitinin İyon Değiştirilmiş Formlarının CO<sub>2</sub> Adsorpsiyonu*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 128 s., 1995.
32. YÖRÜKOĞULLARI, E., *Doğal Zeolitlerde Fiziksel Adsorpsiyon Uygulamaları*, Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, 58 s., 1997.
33. YÖRÜKOĞULLARI; E., *Fiziksel Adsorpsiyon*, Yüksek Lisans Ders Notları, 1995.
34. YÖRÜKOĞULLARI; E., *Moleküler Elek Zeolitler*, Doktora Ders Notları, 1993.
35. YÖRÜKOĞULLARI, E., TAŞAL,E., ORHUN,Ö., *Hemodiyaliz Sıvısının Doğal ve Modifiye Zeolitlerde Regenerasyonu*, 5. Ulusal Kil Sempozyumu, Eskişehir, s. 400-407, 16-20 Eylül 1991.

## 9. EKLER

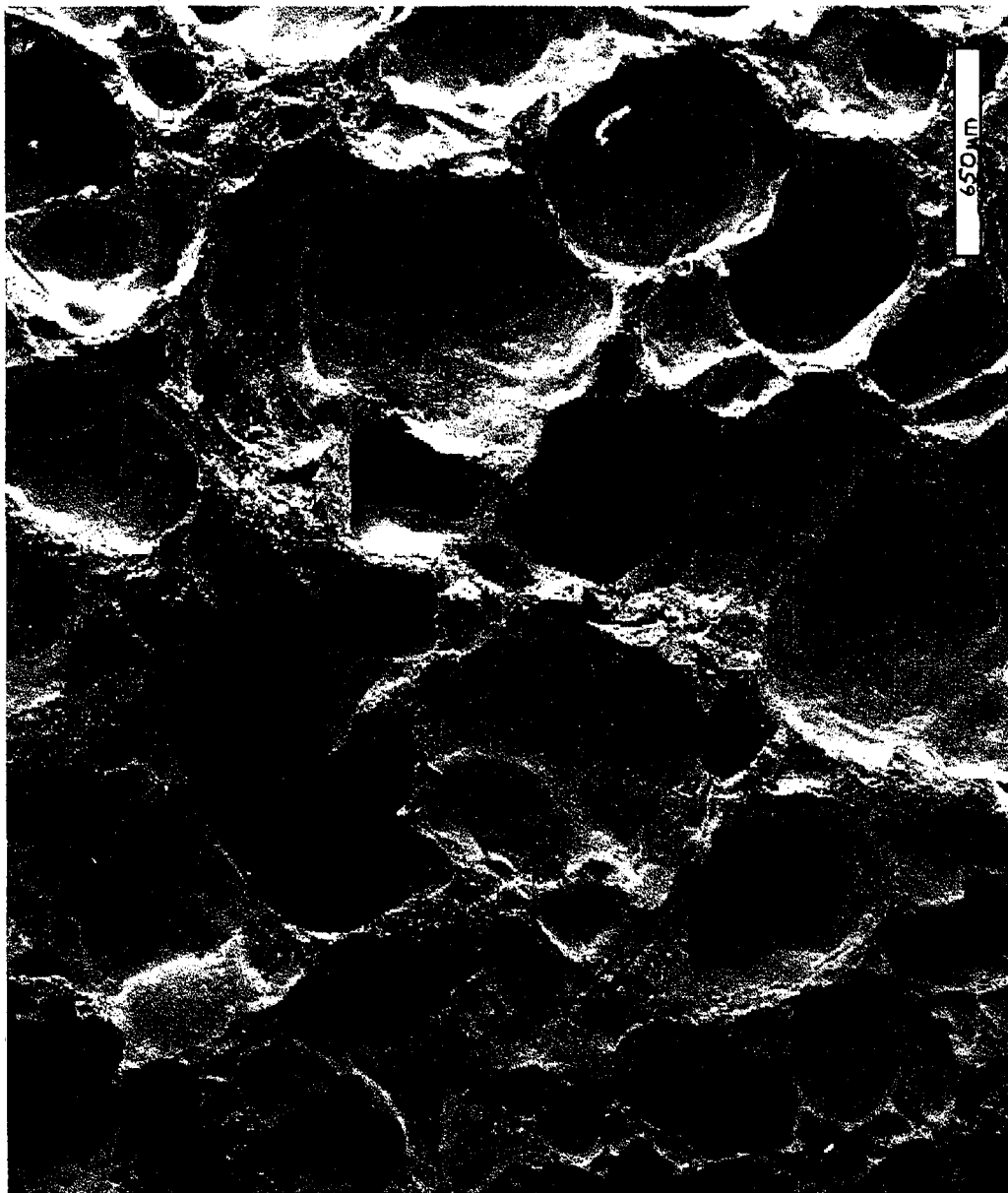


EK-1. Manisa-Gördes yöresine ait XRD grafiği

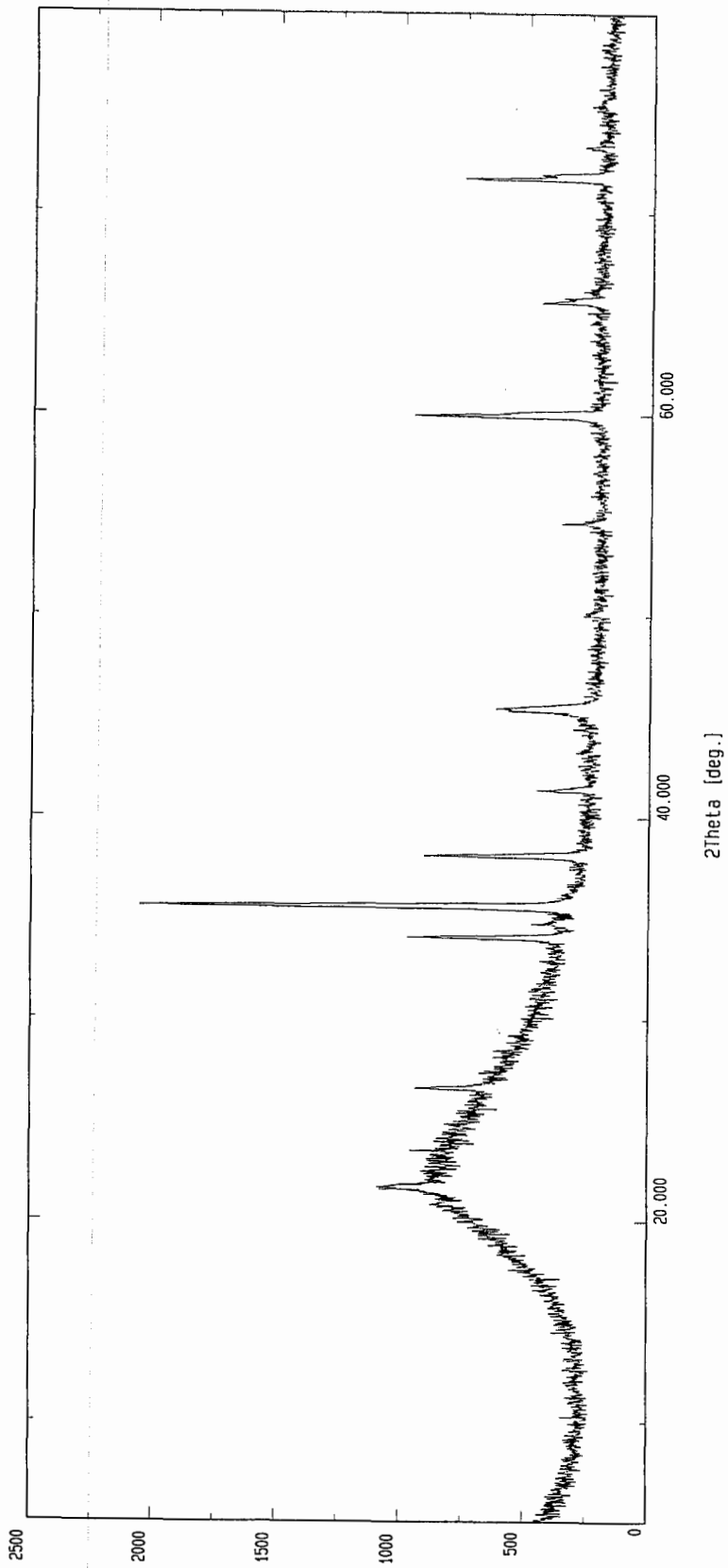




**EK-2. Balıkesir-Bigadiç yöresine ait XRD grafiği**



**EK-3. Elde edilen anafom' un SEM fotoğrafı**



**EK-4. Elde edilen anafom' un XRD grafiği**