



## Akpınar (Kırşehir) Bölgesi Nefelinli Siyenitinin Teknolojik Özelliklerinin Araştırılması

*The Research about the Technological Properties of Nepheline Syenite in Akpınar (Kırşehir) Region*

Serhan Haner\* 

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Dinar Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Afyonkarahisar, Türkiye

### Öz

Nefelinli siyenitin en büyük tüketim alanları cam ve seramik sanayileridir. Serbest silis içermemesi, yüksek alkali ve alümina içermesi, yüksek ergitme gücü ve dar erime aralığı, cam endüstrisine ideal uyum gösteren karakteristiklerdir. Endüstrinin çeşitli kollarında kullanım alanı ve miktarı hızla artan bu değerli hammaddenin en büyük rezervleri Rusya, Kanada, Norveç, Brezilya, Çin ve Türkiye’de bulunmaktadır. Türkiye’deki madenciligi, Kırşehir ilinin Akpınar bölgesinde yapılmaktadır. Akpınar-Kırşehir yöresi nefelinli siyeniti, İç Anadolu Kristalen Karmaşığı içerisinde yayılım açısından en küçük intrüzif kütlelerden biri olup alkali plütonik kayalardan oluşmaktadır. Türkiye’deki sanayiciler açısından, nefelinli siyenitin alışımlışın dışında pahalı bir hammadde olarak görülmesi sonucunda, tüketimi düşük miktarlarda olmaktadır. Yeterince ilgi gösterilmeyen bu hammadde hakkında akademik anlamdaki bilimsel çalışmaların sınırlı kaldığı da görülmüştür. Hammaddelerin tane boyutunun küçültmesi aşamasında ortaya çıkan enerji tüketimi kayacın kristal yapısı, fiziksel ve mekanik özellikleri ile ilişkilidir. Bu çalışmada, Akpınar-Kırşehir yöresindeki nefelinli siyenitin mineralojik, ısıl, fiziksel ve mekanik özellikleri ile Hardgrove öğütülebilirlik değeri (HGI: Hardgrove Grindability Index) araştırılmıştır. Nefelinli siyenitin mineralojik özellikleri, X-Işını kırınımı (XRD: X-Ray diffraction) ve ince kesit incelemeleri ile; ısıl özellikleri, termogravimetrik ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC/TGA: termogravimetric and differential scanning calorimetry) ve pişme rengi ölçümü ile belirlenmiştir. Fiziksel özelliklerinden, birim hacim ağırlık, su emme oranı ve porozite değerleri; mekanik özelliklerden, Schmidt yüzey sertliği, Ultrasonik P dalga hızı ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Ayrıca HGI değerinden Bond iş indeksi değeri hesaplanmıştır.


**Anahtar Kelimeler:** Fiziko-mekanik özellik, Isıl özellik, Kırşehir, Mineraloji, Nefelinli siyenit

### Abstract

The largest fields of consumption of nepheline syenite are the glass and ceramic industries. Its not containing free silica, containing high alkali and alumina, high melting power, and narrow melting range are ideal characteristics for the glass industry. Its field of use in various branches of the industry and the largest reserves of this valuable raw material whose quantity is rapidly increasing are found in Russia, Canada, Norway, Brazil, China, and Turkey. Its mining in Turkey is done in the Akpınar region of Kırşehir. Akpınar-Kırşehir region nepheline syenite is one of the smallest intrusive masses in the Central Anatolian Crystalline Karm dish spread and consists of alkali plutonic rocks. As a result of nepheline syenite being seen as an expensive raw material other than its being accustomed to in terms of industrialists in Turkey, it is being consumed at low quantities. It has also been seen that scientific studies in an academic sense about this raw material, which has not been shown sufficient interest, are limited. The energy consumption occurring during the reduction of the particle size of the raw materials is related to the crystal structure, physical and mechanical properties of the rock. In this study, mineralogical, thermal, physical and mechanical properties and Hardgrove grindability of nepheline syenite in Akpınar-Kırşehir region were investigated. The mineralogical properties of nepheline syenite were determined by X-Ray diffraction (XRD) and thin section studies; The thermal properties were determined by thermogravimetric and differential scanning calorimetry (DSC/TGA) and firing color measurement. Physical properties of unit weight, water absorption rate and porosity values; Among the mechanical properties, Schmidt surface hardness, Ultrasonic P wave velocity and uniaxial compressive strength values were determined. In addition, the Bond work index value was calculated from the HGI value.

**Keywords:** Physico-mechanical features, Thermal feature, Kırşehir, Mineralogy, Nepheline syenite

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: shaner@aku.edu.tr

Serhan Haner  [orcid.org/0000-0002-8579-078X](https://orcid.org/0000-0002-8579-078X)

## 1. Giriş

Nefelinli siyenitler, manto türevli silişçe doymamış mağmaların olağan magmatik ayrışma süreciyle oluşurlar. Nefelinli siyenitler, magmatik kökenli alkalin derinlik kayalarındır. Nefelinli siyenitler magmatik ayrışmanın çok ilerlemiş döneminde kristalleşirler. Volkanik eşdeğeri fonolittir. Kanada yataklarının bazıları çeşitli bölgesel tektonik olaylar esnasında metamorfizma geçirmiştir. Diğer taraftan, daha eski bir yatak olan Finlandiya'daki Livaara yatağı için metasomatik köken önerilmiştir (Haner ve Demir 2018, McLemore 2006, Tuzcu 1992). Tipik olarak alkali ya da karbonatit kompleksler ile ilişkili nefelinli siyenitler dünya genelinde ekonomik ve akademik alanlarda büyük ilgi görmektedir. Cam ve seramikte kullanılabilecek ekonomik nefelinli siyenit yataklarına ender rastlanır. Genellikle nefelinli siyenit yatakları endüstriyel kullanım açısından yüksek demir içeriğine sahiptirler. En büyük rezervler ve küresel nefelinli siyenit üreticileri Rusya, Kanada, Norveç, Brezilya, Çin ve Türkiye'de bulunmaktadır. Dünya genelinde 2013 yılında, 59.3 milyon dolar tutarında (491.000 ton) nefelinli siyenit ithalatı yapılmıştır (Haner ve Demir 2018, McLemore 2006, Tanner 2015). Türkiye'de nefelinli siyenit, B&S Yatırım A.Ş. Nefelin İşletmeleri tarafından Kırşehir ili Akpınar ilçesi Buzlukdağı mevkiinde işletilmesi yapılmaktadır. İşletme Kırşehir-Ankara yoluna 12 km mesafededir. Nefelinli siyenitin sahadaki görünür rezerv alanı 2250 m uzunluğa, 1850 m genişliğe ve 450 m derinliğe sahiptir. Bu yataktaki toplam rezervin 1 milyar tonun üzerinde olduğu düşünülmektedir. Karo, vitrifiye, frit, porselen, cam, izolator, çimento, izolasyon ve elektrod sanayilerine uygun özelliklerde nefelinli siyenit üretimi yapılmaktadır (Haner ve Demir 2018).

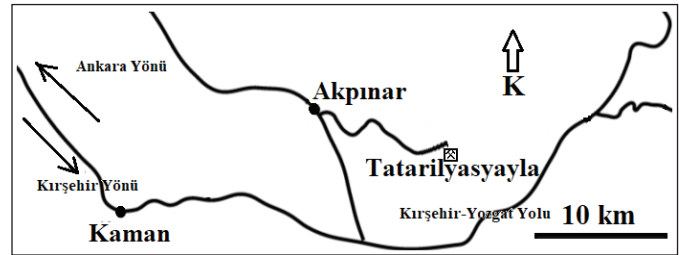
Feldispatik malzemeler yüzlerce yıldır seramik formülasyonunda ana ergitici olarak kullanılmaktadır. Nefelinli siyenit bu yüksek rekabet ortamında önemli bir oyuncudur. Nefelinli siyenitin, düşük ergime noktası ve erime kabiliyetinden dolayı 1900'lerin başlarından beri cam ve seramiklerde kullanımıyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ana pazarları cam, seramik, dolgu, pigment, boya, kaplama ve çatı parçacıklarıdır. Seramik sağlık gereçleri, karolar, elektrik porselenleri, sofrta takımları ve sırlarda, düşük pişirme sıcaklığı ve hızlı pişirme programına imkan sağlamaktadır. Nefelinli siyenit cam kompozisyonuna sağladığı alümina katkısı ile son ürünün mukavemetini geliştirir ve yapıda stabilizatör olarak davranmaktadır. İçerdiği alkaliler sayesinde cam hamurunda ergitici olarak davranmaktadır. Bu da üretimde kullanılan hammaddelerin maliyeti kadar enerji maliyetinde tasarruf

sağlamaktadır. Ayrıca viskoziteyi düşürür ve işlenebilirliği arttırmaktadır. Nefelinli siyenitin kullanılması ile kırılmaya karşı daha fazla dirençli cam ürünler elde edilmektedir (Haner ve Demir 2018, McLemore 2006).

Nefelinli siyenit, uluslararası tanımlamada, "Lösit, nefelin ve nefelinli siyenit (harmonized system code: 252930)" adı altında sınıflandırılmaktadır. Bu nedenle sadece nefelinli siyenit için ihracat ve ithalat rakamları hakkında bilgi sahibi olmak mümkün olmamaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu'nun 2019 yılına ait HS12'ye göre dış ticaret verileri incelendiğinde "Lösit, nefelin ve siyenit nefelin" in yaklaşık olarak 904 tonu ihraç ve 2993 tonu ithal edilmiştir. İhracattan 700.021 TL kazanılırken, ithalata 6.080.580 TL ödemiştir. 2020 yılı için ise yaklaşık olarak 1685 tonu ihraç ve 3378 tonu ithal etmiştir. İhracattan 1.488.289 TL kazanılırken, ithalata 8.723.275 TL ödemiştir (TÜİK 2021). Bu değerlere bakıldığında çok kaliteli olan Türkiye nefelinli siyenitlerinin hem yurtiçi hem de yurtdışı tanıtımının yeterince yapılmadığı görülmektedir. Bu çalışmanın hedefi, Akpınar bölgesi nefelinli siyenitinin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi ve Türkiye için yeni bir kullanım alanı olan seramik sağlık gereçleri sektöründe kullanıma kazandırılmasıdır.

## 2. Gereç ve Yöntem

Çalışmada, BS Yatırım Depolama Madencilik Petrol Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin Kırşehir ili Akpınar ilçesinde bulunan Nefelin İşletmeleri'nden temin edilmiş olan nefelinli siyenit kullanılmıştır (Şekil 1). Nefelinli siyenite ait kimyasal analiz değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. BS Yatırım A. Ş. Kırşehir Nefelin İşletmeleri yer bulduru haritası.

EUROFEL (European Association of Feldspar Producers)'in (Avrupa Feldispat Üreticileri Derneği) yayınlamış olduğu terminolojiye göre % alümina ve % alkali içeriğine göre bir grafik hazırlanmıştır. Çizelge 1'de kimyasal analiz sonucu verilen nefelinli siyenit örneğinin %14'den fazla  $Al_2O_3$  ve %6'dan fazla  $Na_2O+K_2O$  içerdiği

**Çizelge 1.** Tüvenan Akpınar nefelinli siyenitinin kimyasal analizi.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	*K.K	TOPLAM
63.40	19.11	8.23	5.20	1.54	0.19	1.60	0.14	0.05	0.54	100

\*K.K. Kızdırma Kaybı.

**Şekil 2.** BS Yatırım A.Ş. Kırşehir Nefelin İşletmelerinden görüntüler.

görülmektedir. Bu nedenle EUROFEL terminolojisine göre bu numune “feldispat” olarak da tanımlanabilir (Eurofel 2011). Kırşehir’in Akpınar ilçesinde bulunan tesisten bazı görüntüler Şekil 2’de görülmektedir.

Nefelinli siyenit ocağında saha gözlemlerine dayanarak farklı numuneler alınmıştır. Numune alınırken özellikle alınan numunenin kaya kütlelerinin özelliklerini içermesine özen gösterilmiştir. Elde edilen kaya numunelerinin özelliklerinin tespiti için numuneler hazırlanmıştır. İnce kesit incelemeleri Bülent Ecevit Üniversitesi Yer Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi’nde gerçekleştirilmiştir. Faz içerikleri X-Işını kırınım (XRD) yöntemi ile incelenmiştir. Bu amaçla örneklerin, X-Işını kırınım analizleri,  $2\theta=2-80^\circ$ , Cu K- $\alpha$ , 2 derece/dakika tarama hızında çekime tabi tutulmuşlardır. Fiziko-mekanik testler için numuneler 7x7x7 cm ebadından küp olarak TS 699 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. TS 699 standartlarına uygun olarak hazırlanan deney numunelerinde birim hacim ağırlık tayini, su emme ve porozite tayini gibi fiziksel testler ve nokta yükü dayanım indeksi, Schmidt yüzey sertliği, Ultrasonik P dalga hızı ve tek eksenli basınç deneyi gibi mekanik testler yapılmıştır. Fiziko-mekanik testler, Süleyman Demirel Üniversitesi Kazı Mekaniği ve Doğal Taşlar Teknolojisi

Laboratuvarı’nda yaptırılmıştır. Toz numunenin renk (L a b) ölçümleri Konica Minolta marka spektrofotometre cihazı ile yapılmıştır. Pişirim işlemi maksimum sıcaklığı 1191°C’ye ayarlanmış Riedhammer marka tünel fırında (yakıtı doğal gaz, uzunluğu 110 m) gerçekleştirilmiştir. Renk ölçümleri, Çanakçılar Seramik Fabrikası AR-GE biriminde yapılmıştır. Isıl analizi, Simultane Diferansiyel Taramalı Kalorimetre ve Termogravimetrik Analizi (DSC/TGA) hava atmosferde 10°C.dk-1 ısıtma hızında 1100°C sıcakta gerçekleştirilmiştir. DSC/TGA analizi, ODTÜ Merkezi Laboratuvarı’nda TA Instruments SDT 650 Simultane DSC/TGA cihazında yaptırılmıştır. Isıl analiz, ısıl işlem karşısında meydana gelen dekompozisyon ve kristalizasyon davranışlarını karakterize etmekte faydalı bir yöntemdir. Maksimum kalsinasyon sıcaklığını da tanımlamak mümkündür. Termogravimetrik analiz (TGA) ısıtma esnasındaki kütle kaybını, diferansiyel taramalı kalorimetri de (DSC) ısıtma esnasındaki örnek sıcaklığındaki değişimleri ölçmektedir (Carter vd. 2007). Hardgrove öğütülebilirlik indeksini (HGI) belirlemek için, her biri 25.4±0.13 mm çapında olan 8 adet bilyanın hareket ettiği bilya yuvasından oluşan bir değirmen kullanılmıştır. Bilyalar 20±1 dev/dk hız ile döndürülür ve 29±0.2 kg toplam basınçta güç sarf ederler. Deneyde



kullanılan numune boyutu  $-1190+590 \mu\text{m}$ 'dir. Bu boyut aralığına kırılmış,  $100^\circ\text{C}$ 'de nemi uzaklaştırarak desikatörde soğutulmuş malzemeden  $50\pm 0.01$  gram alınarak değirmen 60 tur döndürülmüştür ve  $74 \mu\text{m}$ 'lik elekten elenmiştir. HGI deneyi, Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Öğütülebilirlik değeri Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır.

$$HGI = 13 + 6.93D_{74} \quad (1)$$

$D_{74}$ :  $74 \mu\text{m}$  elek altı miktarı (g).

Deney esnasındaki malzeme kaybı  $0.4$  gramdan fazla olduğunda deney tekrar edilmelidir. Hardgrove değirmeni kömürlerin öğütülebilirliğini ölçebilen bir cihazdır. ASTM D-409 standartlara uygun hale getirilmiş kömürlerin relatif öğütülebilirliği veya kömürlerin toz haline getirilmesindeki kolaylığı saptama işlemini kapsar. Hardgrove öğütülebilirlik

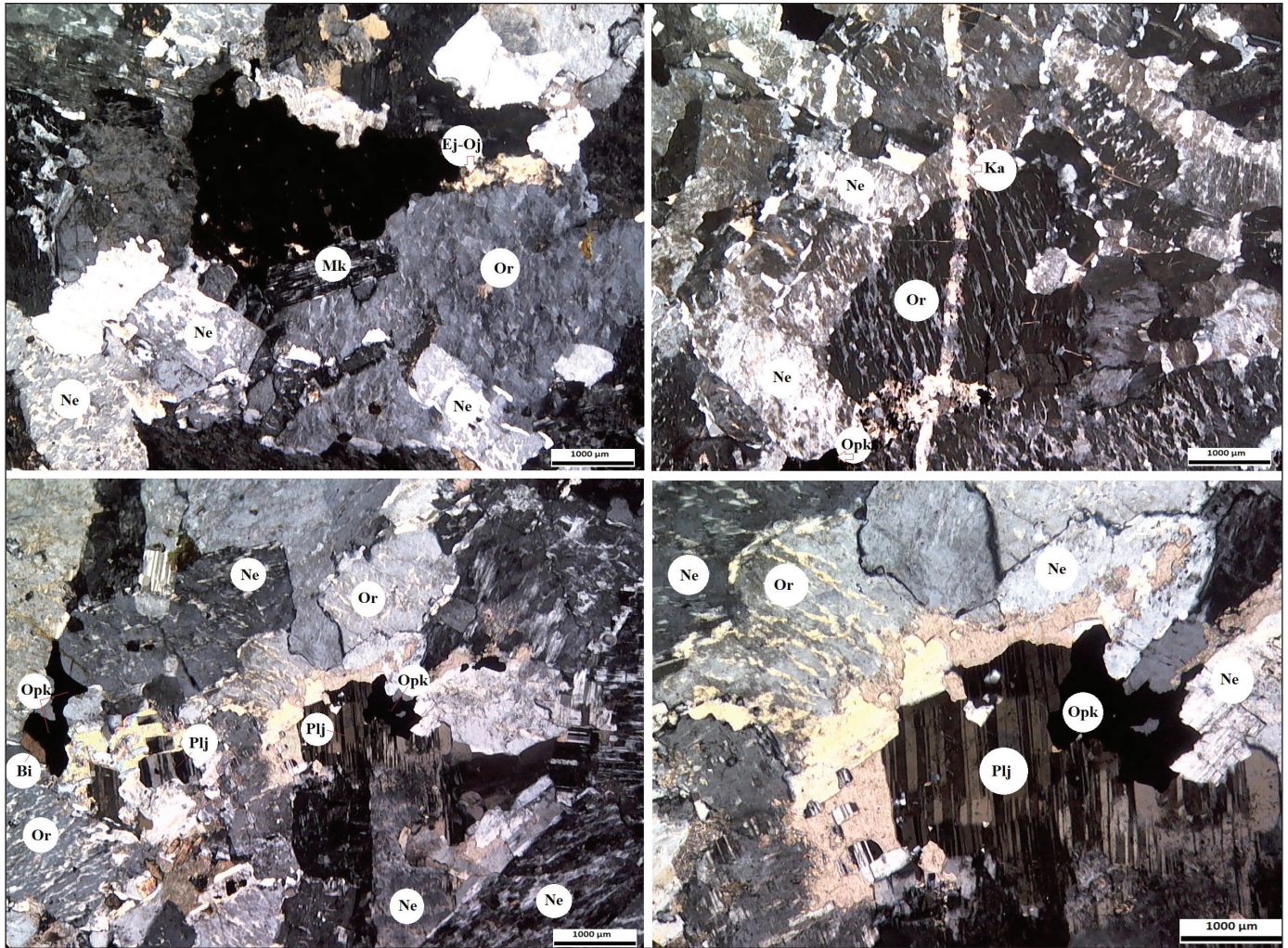
indeksi (HGI) ile Bond iş indeksi ( $W_i$ ) arasındaki ilişki Eşitlik 2 ile verilmiştir (Aplan 1996, Aplan vd. 1974).

$$W_i = 511/HGI^{0.96} \quad (2)$$

### 3. Bulgular

#### 3.1. Petrografik Özellikler

Nefelinli siyenit kayacına ait ince kesit görüntüleri Şekil 2 ve mineralojik bileşim ve tane boyutu Çizelge 2'de görülmektedir. Şekil 3 incelendiğinde, kayacın genellikle, eş tane boyutlu, tümüyle kristalli (equigranuler/holokristalin) doku egemendir. Nefelinler, yarı öz şekilli (subhedral), özşekilli (euhedral), köşeli, yarı köşeli tane/kristal tane şekline sahip, ikizlenme sunmayan, pürüzsüz taze yüzeyli, prizmatik kristaller şeklinde yer almaktadırlar. Ortoklaslar, yarı öz şekilli, yarı köşeli, pertitik (film pertit) yapılar/



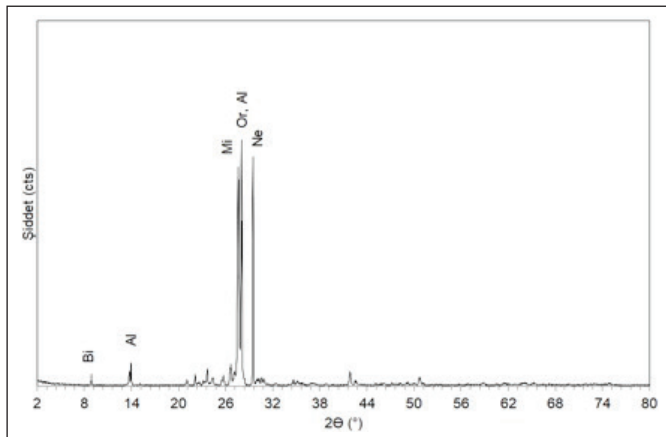
Şekil 3. Nefelinli siyenit örneğinin ince kesit görüntüleri (Ne: Nefelin, Or: Ortoklas, Plj: Plajiyoklas, Mk: Mikrolin, Bi: Biyotit, Opk: Opak mineral, Ej-Oj: Ejirin-Ojit) (Haner 2020).



eksolusyon yapıları içerir ve açık gri-bej birefrenjans renklerde dirler. İçerisinde kapanımlar şeklinde epidot, rutil tali oranda izlenmiştir. Çok hafif oranda serisitleşme ve lokal karsbad ikizlenmesi sunmaktadırlar. Plajiolklas, yarı öz şekilli, polisentetik ikizlenmeli, 10-12°lik sönüm açılara sahip albit kısmende oligoklas özelliğindedirler. Mikrolin, yarı öz şekilli, yarı köşeli, çift yönlü polisentetik ikizli, koyu gri-füme birefrenjans renk tonlarındadır. Biyotit, yarı öz şekilli, çoğunlukla kloritleşmiş ve dilinimleri boyunca opaklaşmış kristaller şekliindedirler. Kloritleşme sonrasında birefrenjans renklerinde açık yeşil (çimen yeşili) ve açık kahve rengi-sarımsı renk tonları kazanmışlardır. Opak mineral, yarı köşeli, magmatik olarak aşındırılmış, kemirilmiş, körfez yapıları kazanmışlar ve lokal iskelet yapıları sunmaktadırlar. Çoğunlukla doku içinde saçınımlar şeklinde dağılım gösterirler ve görsel olarak manyetit olarak tanımlanmıştır. Ejirin-ojitler (klino piroksen), öz şekilsiz, parçalı-kırıklı, pseudomorfik relikte renkli, rölyefi yüksek parçacıklar şeklinde pleokroizmaları düşük veya yok ve yeşil renklerde izlenmektedirler (Haner 2020).

**Çizelge 2.** Nefelinli siyenit örneğinin ince kesitlerinden belirlenen mineralojik bileşimi ve tane boyları.

Mineral bileşimi	% Oran	Tane boyutu (mm)
Ortoklas	25-30	0.2-1.8
Mikrolin	10-15	0.15-1.25
Nefelin	30-35	0.25-3.3
Biyotit	4-5	0.15-0.85
Plajiolklas (albit-oligoklas)	8-10	0.15-0.4
Klino piroksen (ejirin-ojit)	3-7	0.15-0.25
Opak mineral	2-5	0.1-0.85



**Şekil 4.** Tüvenan nefelinli siyenitin X-ışınları kırınımı diyagramı (Bi: Biyotit, Or: Ortoklas, Al: Albit, Ne: Nefelin, Mi: Mikrolin).

### 3.2. X-ışını Kırınımı (XRD) Analizi

Tüvenan nefelinli siyenite ait XRD analizi sonucu Şekil 4'de verilmiştir.

Şekil 4'deki XRD analizinde kayacın ana olarak nefelin, ortoklas, albit ve mikrolin minerallerinden oluştuğu görülmektedir. Bu ana mineraller dışında az miktarda biyotit minerali saptanmıştır.

### 3.3. Fiziko-Mekanik Özellikler

TS 699 standartlarına uygun olarak hazırlanan deney numunelerinde birim hacim ağırlık tayini, su emme ve porozite tayini gibi fiziksel testler ve nokta yükü dayanım indeksi, Schmidt yüzey sertliği, ultrasonik P dalga hızı ve tek eksenli basınç deneyi gibi mekanik testler yapılmıştır. Nefelinli siyenit örneklerinin fiziksel özellikleri Çizelge 3 ve mekanik özellikleri Çizelge 4'de verilmiştir.

**Çizelge 3.** Nefelinli siyenitin fiziksel özellikleri.

Fiziksel özellikler	S	$X^{-}$
Birim hacim ağırlık ( $g/cm^3$ )	0.004	2.559
Atmosfer basıncında ağırlıkça su emme oranı (%)	0.034	0.260
Görünür porozite (%)	0.093	0.628

S: Standart sapma,  $X^{-}$ : Aritmetik ortalama.

Çizelge 3 incelendiğinde nefelinli siyenitin birim hacim ağırlığının  $2.559 g/cm^3$ , atmosfer basıncında ağırlıkça su emmenin %0.260, görünür porozitenin %0.628 olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçlarından, birim hacim ağırlık deneyi sonuçlarının standart sapması 0.004, atmosfer basıncında ağırlıkça su emme deneyi sonuçlarının standart sapması 0.034, görünür porozite deneyi sonuçlarının standart sapması 0.093 olarak hesaplanmıştır.

Kayaçların mekanik özellikleri, kırma öğütme gibi boyut küçültme işlemlerinin veriminde önemli bir etkiye sahiptir. Bu sebeple, nefelinli siyenitin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Schmidt yüzey sertlik deneyi ISRM (1981)'ye göre, nokta yük dayanım indeksi, sonik hız (P dalga) deneyi ile tek eksenli basınç dayanımı deneyleri Türk Standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları topluca Çizelge 4'de verilmektedir.

Schmidt sertlik tayini, arazi ve laboratuvar ortamında, kayaçların sertliklerinin belirlenmesinde ve tek eksenli basma dayanımlarının dolaylı yoldan tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan, kayacın bütünlüğüne zarar vermeyen bir test yöntemidir. Yapılan çalışmada, nefelinli siyenitin Schmidt sertlik değeri 43.30 olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 4.** Nefelinli siyenitin mekanik özellikleri.

Mekanik özellikler	S	X <sup>-</sup>
Schmidt yüzey sertlik indeksi	4.27	43.30
Nokta yükü dayanım indeksi (MPa)	0.90	6.30
Sonik hız deneyi (P) (km/sn)	0.19	5.70
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	3.80	86.90

S: Standart sapma, X<sup>-</sup>: Aritmetik ortalama

Çizelge 4'de görüldüğü gibi, nefelinli siyenitin nokta yükü dayanım indeksi değeri 6.30 olarak belirlenmiştir.

Ultrasonik P dalga hızı deneyi, numuneye zarar vermeden kayaç halindeki numunenin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Prob tarafından üretilen elektriksel sinyalin mekanik titreşime dönüşmektedir. Kayaç numunesinin içerisine bu titreşim gönderilir ve alıcı tarafından veriler kaydedilir. Verici ve alıcı arasındaki süre hesaplanır. Sonik hız analizi, kayacın sahip olduğu mikro ve makro çatlaklar, mineralojik yapı, gözeneklilik, doku gibi fiziksel özelliklerin tahmini için yapılmaktadır. Gözenekliliği düşük, süreksizliği az ve homojen yapıya sahip olan kayaçlarda sonik hızı değerleri yüksek çıkmaktadır. Yapılan analiz neticesinde nefelinli siyenitin P dalga hızı 5.70 km/sn olarak bulunmuştur (Çizelge 4).

Tek eksenli basınç dayanımı deneyi, kayacın deformasyon, dayanım ve yapısal özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan bir deney metodudur. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi, kaya örneğinin üzerine basma yükü uygulanması sonucunda kayacın kırılmasına kadar göstermiş olduğu dayanımı ifade eder. Nefelinli siyenitin tek eksenli basma dayanımı değeri 86.90 MPa olarak bulunmuştur (Çizelge 4).

Deney sonuçlarından, Schmidt yüzey sertlik indeksi deneyi standart sapması 4.27, nokta yükü dayanım indeksi deneyi standart sapması 0.90, sonik hız deneyi standart sapması 0.19 ve tek eksenli basınç dayanımı deneyi standart sapması 3.80 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4).

### 3.4. Isıl Davranış

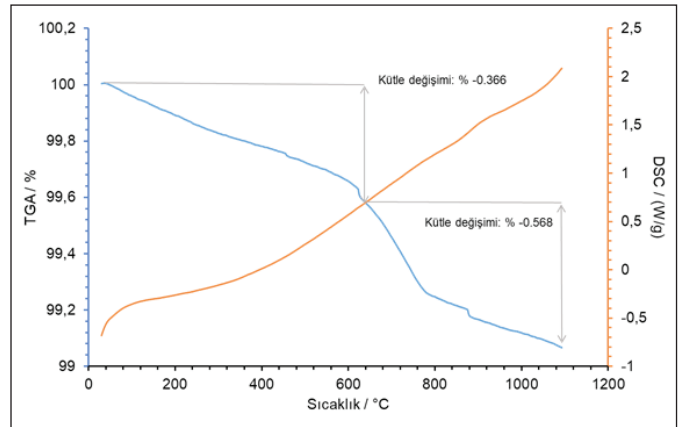
Çizelge 5 ve Şekil 5'te, nefelinli siyenit örneğine ait pişme rengi değerleri ve numunesi görülmektedir. Nefelinli siyenitin, L (açıklık koordinatı) değeri 69.14, a (kırmızı/yeşil koordinatı) değeri 0.59 ve b (sarı/mavi koordinatı) değeri 7.25'dir.

**Çizelge 5.** Nefelinli siyenitin 1200°C'deki pişme rengi değerleri.

L	a	b
69.14	0.59	7.25

**Şekil 5.** Nefelinli siyenitin 1200°C'deki pişme rengi numunesi.

Tüvenan nefelinli siyenitin termogravimetrik ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC/TGA) analizleri hava atmosferde 10°C.dk<sup>-1</sup> ısıtma hızında 1100°C sıcakta gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir.

**Şekil 6.** Tüvenan nefelinli siyenitin DSC/TGA termogramları.

### 3.5. Hardgrove Öğütülebilirlik İndeksi (HGI)

Nefelinli siyenit örneğinin Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanan Hardgrove indeksi (HGI) 56.66 olarak belirlenmiştir. HGI değerinden Eşitlik 2 ile hesaplanan Bond iş indeksi (W<sub>i</sub>) değeri de 10.60 kW/s/t'dur.

## 4. Tartışma

Tüvenan hammadde incelendiğinde, demir oksit içeriğinin %1.60 olduğu görülmektedir. Seramik bünyelerin pişme işlemi esnasında oksitleyici atmosfer nedeniyle demir (II) demir (III)'e yükseltgenerek bünyeyi sarıya boyayabilir (Vi-

eira vd. 2006). Bu haliyle tüvenan nefelinli siyenitin seramik veya cam sektöründe kullanılması mümkün görülmemektedir. Cam yapımında genellikle -40+200 mesh tane boyutunda kaba öğütülmüş nefelinli siyenit kullanılmakta olup, ortalama  $>23 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ,  $>14 \text{ Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ve  $<0.1 \text{ Fe}_2\text{O}_3$  olmalıdır. Ancak koyu cam ve fiberglasta  $<0.35 \text{ Fe}_2\text{O}_3$  içeriği kabul edilebilir (Ciullo 1996, McLemore 2006). Tesisin piyasaya satmakta olduğu zenginleştirilmiş nefelinli siyenitin demir içeriğinin %0.29'a kadar indirildiği bilinmektedir. Zenginleştirilmiş olarak seramik ve cam endüstrilerinde kullanıma uygundur. Tesiste tüvenan nefelinli siyenite, çeneli kırıcı ve çubuklu değirmende (10 ton döküm bilya, sulu ortamda) boyut küçültme işlemleri uygulanmaktadır. Daha sonra 1100 Gauss şiddetinde 15 ton/saat kapasiteli yaş manyetik ayırma ve 6 ton/saat kapasiteli kurutma işlemleri uygulanmaktadır. Kurutulan hammaddeye 12000 Gauss şiddetinde 10 ton/saat kapasiteli kuru manyetik ayırma uygulanmakta ve nefelinli siyenit piyasa sürülmektedir.

İnce kesit incelemelerinde, nefelinli siyenite ait kayaç örneğinin genel olarak nefelin, ortoklas, mikrolin, plajioloklas, klino piroksen, biyotit ve opak mineralleri içerdiği görülmüştür. Bu kristallerin tane boyutu sırasıyla, 250-3300  $\mu\text{m}$ , 200-1800  $\mu\text{m}$ , 150-1250  $\mu\text{m}$ , 150-400  $\mu\text{m}$ , 150-250  $\mu\text{m}$ , 150-850  $\mu\text{m}$  ve 100-850  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. XRD analizi sonucu ince kesit analizini destekler niteliktedir. XRD analizi sonucunda nefelin, ortoklas, mikrolin, albit ve biyotit tespit edilmiştir. Kayaçın XRD analizi sonucunda tespit edilen fazlar, kimyasal analiz ve petrografik analiz ile de örtüşmektedir.

Kayaçın görünür porozite değeri %0.628 olarak belirlenmiştir. Moos ve Quervain (1948)'in yapmış olduğu, kayaçların porozite oranına göre sınıflandırmasında (Çizelge 6) kayaçın "çok kompakt" kayaç sınıfına girdiği görülmektedir.

**Çizelge 6.** Kayaçların porozite değerlerine göre sınıflandırılması (Moos vd. 1948).

Kayaç sınıfı	Porozite (%)	Akpınar nefelinli siyeniti
Çok kompakt	< 1	0.628
Az boşluklu	1-2.5	
Orta boşluklu	2.5-5	
Oldukça boşluklu	5-10	
Çok boşluklu	10-20	
Çok fazla boşluklu	> 20	

Nefelinli siyenitin Schmidt sertlik değeri 43.30 olarak tespit edilmiştir. ISRM (1981) tarafından yapılmış olan

belirlemeye göre bu kayaçın "sert" kayaç sınıfına girdiği görülmüştür (Çizelge 7).

**Çizelge 7.** Kayaçların Schmidt sertliğine göre sınıflandırılması (ISRM 1981).

Kaya sınıfı	Schmidt yüzey sertlik değeri	Akpınar nefelinli siyeniti
Fevkalade yumuşak	16-20	
Çok yumuşak	20-24	
Yumuşak	24-30	
Sert	30-45	43.30
Çok sert	45-60	
Fevkalade sert	> 60	

Nefelinli siyenitin nokta yükü dayanım indeksi değeri 6.30 olarak belirlenmiştir. Bieniawski (1975) tarafından yapılmış olan belirlemeye göre bu kayaçın "yüksek dayanımlı" kayaç sınıfına girdiği görülmüştür (Çizelge 8).

**Çizelge 8.** Kayaçların nokta yük dayanımlarına göre sınıflandırılması (Bieniawski 1975).

Kaya sınıfı	Nokta yük dayanımı (MPa)	Akpınar nefelinli siyeniti
Çok yüksek dayanımlı	> 7.845	
Yüksek dayanımlı	7.845-3.923	6.30
Orta dayanımlı	3.923-1.961	
Düşük dayanımlı	1.961-0.981	
Çok düşük dayanımlı	< 0.981	

Nefelinli siyenitin P dalga hızı 5.70 km/sn olduğu tespit edilmiştir. Anonim (1979) tarafından yapılmış olan belirlemeye göre bu kayaçın "çok yüksek hıza sahip" kayaç sınıfına girdiği görülmüştür (Çizelge 9).

**Çizelge 9.** P dalga hızı sınıflaması (Anonim 1979).

Sınıf	Dalga hızı (km/sn)	Tanımlama	Akpınar nefelinli siyeniti
1	< 2.5	Çok düşük hız	
2	2.5-3.5	Düşük hız	
3	3.5-4.0	Orta hız	
4	4.0-5.0	Yüksek hız	
5	> 5.0	Çok yüksek hız	5.70

Kayaçın tek eksenli basma dayanımı 86.90 MPa olarak bulunmuş olup, Deere ve Miller (1966) tarafından yapılmış olan belirlemeye göre, "orta dirençli" kayaç sınıfına girdiği görülmüştür (Çizelge 10).

**Çizelge 10.** Kayaçların tek eksenli basma dayanımına göre sınıflandırılması (Deere vd. 1966).

Kaya sınıfı	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Akpınar nefelinli siyeniti
Çok düşük dirençli	< 25	
Düşük dirençli	25-50	
Orta dirençli	50-100	86.90
Yüksek dirençli	100-200	
Çok yüksek dirençli	> 200	

Nefelinli siyenitin, L değeri 69.14'dür ve beyaz/açık değere yakındır. a değeri 0.59'dur ve kırmızı-yeşil bileşen değeri nõtüre yakındır. b değeri 7.25'dir ve sarı bileşen daha yoğundur. L\*, a\*, b\* sonuçlarından, b\* değerinde sarı renk aralığında oluşan renklenmenin numunenin içerisindeki Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi safsızlıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 6 incelendiğinde TGA eğrisinde üç reaksiyon gerçekleşmiştir. Yaklaşık 450°C ve 640°C'deki bu pikler kuvvetli bağlanmış kristal su moleküllerinin uzaklaştığını göstermektedir. TGA eğrisinde 640°C'ye kadar %0.366'lık kütle kaybı olmuştur. TGA eğrisinde 1100°C'ye kadar ki toplam kütle kaybı %0.934'dir. TGA ve DSC eğrilerinde yaklaşık 880°C'de bir pik görülmektedir. Bu, karbonatların bozunmasını gösteren piktir.

HGI ve Bond iş indeksi değerlerinden zor öğütülebilir bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır. Dayanım özellikleriyle öğütülebilirlik özellikleri ilişkilidir. Literatürde kayaçların teknik özellikleri ile kırılma parametreleri arasındaki ilişkiyi açıklayan çalışmalar mevcuttur (Kılıç vd. 2019, Özer 2006). Öğütülebilirlik, malzemenin kristal yapısı, bu yapının içindeki kristal ve fiziksel yapı bozuklukları ile de ilişkilendirilebilir. Ayrıca hammadde, kırma ve öğütme gibi boyut küçültme işlemlerine karşı, sahip olduğu mekaniksel ve elastik özellikleri ölçüsünde karşı koyabilmektedir. Mekaniksel test sonuçlarına göre sert, yüksek dayanımlı ve orta dirençli kaya sınıfına girdiği görülen nefelinli siyenitin, HGI ve Bond iş indeksi değeriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Nefelinli siyenitin öğütülebilirlik değerleri, seramik sektörü tarafından hâlihazırda kullanılan feldispatik hammaddelerin iş indeksleri değerleri ile kıyaslandığında öğütme esnasında enerji tasarrufu sağlayacağı açıktır.

Seramik ve cam endüstrisinde yüzlerce yıldır feldispatik malzemeler ergitici olarak rol oynamaktadır. Dünya genelinde feldispatın elliden fazla ülkede üretimi yapıldığı bilinmektedir. Türkiye'nin bu rekabet ortamında ayrı bir

yeri bulunmaktadır. Çok kaliteli feldispat yatakları bulunan Türkiye aynı zamanda dünya feldispat rezervinin yaklaşık %14'ünü de sahiptir. Ticari feldispat kaynağı olarak granitik kayaç, nefelinli siyenit, altere granit, granit kum ve pegmatit üretilmektedir. Bu feldispat kaynakları içerisinde, nefelinli siyenitin sahip olduğu özellikler ve ekonomik değer ayrıca ele alınmalıdır. Nefelinli siyenit, cam üretimi için gerekli olan alümina ve alkalinin ucuz bir kaynağıdır. Dolayısıyla hammadde maliyetini azaltmaktadır. Cam ve seramik endüstrilerinde nefelinli siyenite en etkili rakip feldispattır. Feldispat ve nefelinli siyenit arasındaki seçimde ulaşım ve konum maliyetleri göz önünde bulundurulur. Türkiye'de cam ve seramik sektörlerinde nefelinli siyenitin kullanımı pahalı bulunmakta ve yerine diğer feldispatik malzemeler kullanılmaktadır. Bu nedenle zenginleştirme ürünü nefelinli siyenit çeşitli ülkelere ihraç edilmektedir.

## 5. Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde 118M224 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

## 6. Kaynaklar

- Anonim, 1979.** Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part I-Rock and Soil Materials. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 19:364-371. Doi: 10.1007/BF02600503.
- Aplan, F. F. 1996.** The hardgrove test for determining the grindability of coal. In Lecture Note on MN PR 301:Elements of Mineral Processing, Department of Energy&Geo-environmental Engineering, Pennsylvania State University, State College, Pennsylvania, pp. 92-93.
- Aplan, F. F., Austin, L. G., Bonner, C. M., Bhatia, V. K. 1974.** A Study of Grindability Tests, Report to U.S. Bureau of Mines, Project G0111786.
- Bieniawski, Z. T. 1975.** The point load test in geotechnical practice, *Engineering Geology* 9(1): 1-11. Doi: 10.1016/0013-7952(75)90024-1.
- Carter, C. B., Norton, M. G. 2007.** Ceramic Materials Science and Engineering, Springer: Electronic book, e-ISBN-10: 0-387-46271-6.
- Ciullo, P. A. 1996.** Industrial Minerals and Their Uses. Noyes Publications, New Jersey, No: 96-29173, 632 s.
- Deere, DU., Miller, RP. 1966.** Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock. Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, 300.
- Eurofel 2011.** Feldspar. European Association of Feldspar Producers. [https://www.ima-europe.eu/sites/ima-europe.eu/files/minerals/Feldspar\\_An-WEB-2011.pdf](https://www.ima-europe.eu/sites/ima-europe.eu/files/minerals/Feldspar_An-WEB-2011.pdf).



- Haner, S. 2020.** The effects of ball size on the determination of breakage parameters of nepheline syenite. *J. Min. Sci.* 56(5):848-856.
- Haner, S., Demir, M. 2018.** Nefelinli siyenit: bir gözden geçirme. *Jeol. Mühendisliği Derg.* 42(1):107-120. Doi: 10.24232/jmd.434144.
- ISRM 1981.** in: Brown, E.T. (ed), 1981. Rock Characterization Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods. Pergamon, Oxford.
- Kılıç, A., Teymen, A., Özdemir, O., Atiş, C.D. 2019.** Estimation of compressive strength of concrete using physico-mechanical properties of aggregate rock. *Iran J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.* 43:171-178. Doi: 10.1007/s40996-018-0156-6.
- McLemore, V.T. 2006.** Nepheline syenite, Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. [eds.]. *Industrial Minerals & Rocks* (7th Edition). Published by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, s. 653-670.
- Moos, A. V., Quervain, F. D. 1948.** *Technische Gesteinkunde*, Verlag Birkhauser, Basel.
- Özer, Ü., Çabuk, E. 2006.** Bond iş indeksi ve kaya parametreleri arasındaki ilişki. *İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi* 20(1): 42-49.
- Tanner, A. O. 2015.** Feldspar and nepheline syenite, 2013. Minerals yearbook, U.S. Geological Survey. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/feldspar/myb1-2013-felds.pdf>.
- Tuzcu, N. 1992.** Petrografi-I (Magmatik Kayaçlar). 3. Basım, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Basım Ünitesi, İzmir, Sayı: 100, 222 s.
- TÜİK 2021.** Dış Ticaret İstatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu. [https://iz.tuik.gov.tr/#/showcase/SC-2851FY777F34D2R/db-3dy3w51uv130f9g?filters = 18792%3D2019%2618792%3D2020%2619324%3D252930000000%20-%20L%20C3%B6sit%252C%20nefelin%20ve%20siyenit%20nefelin%20 - %20 \(KG\) & mode = &token = 8d79727fff862a891ce574d27220b-febbf66fed](https://iz.tuik.gov.tr/#/showcase/SC-2851FY777F34D2R/db-3dy3w51uv130f9g?filters = 18792%3D2019%2618792%3D2020%2619324%3D252930000000%20-%20L%20C3%B6sit%252C%20nefelin%20ve%20siyenit%20nefelin%20 - %20 (KG) & mode = &token = 8d79727fff862a891ce574d27220b-febbf66fed).
- Vieira, C. M. F., Peçanha, L. A., Monteiro, S. N. 2006.** Effect of kaolinitic clays from the state of Rio de Janeiro in the composition of whiteware floor tile bodies. *Ceramica* 52: 138-145. Doi: 10.1590/S0366-69132006000200004.